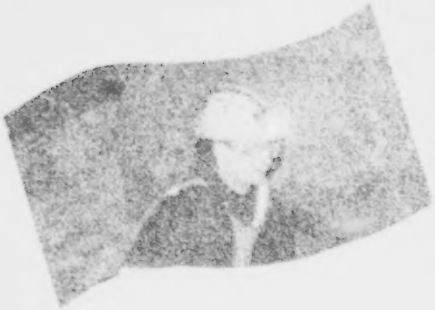
Développement d'un système d'analyse d'images pour la caractérisation des massifs rocheux

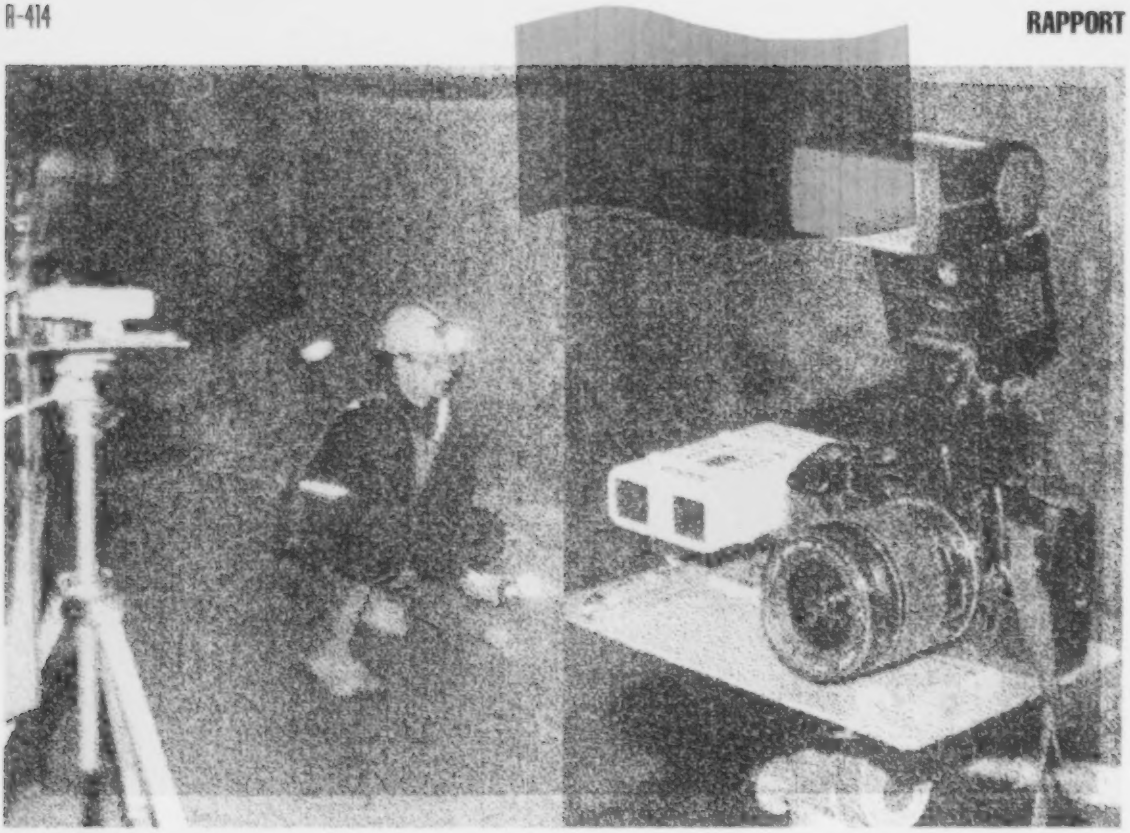


ÉTUDES ET RECHERCHES

John Hadjigeorgiou
Frank Lemy

R-414

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, avril 2005

105-06308/

Développement d'un système d'analyse d'images pour la caractérisation des massifs rocheux

ÉTUDES ET RECHERCHES

John Hadjigeorgiou et Frank Lemy

Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux,
Université Laval

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Sommaire

Depuis 1994, 352 accidents provoqués par l'impact d'une roche provenant directement du massif rocheux ont été constatés dans les mines souterraines du Québec (A.P.S.M., 2000). Ces accidents sont responsables d'invalidités temporaires ou permanentes et peuvent causer dans certains cas le décès de la victime.

Le problème majeur demeure la récolte d'informations fiables afin d'améliorer la conception des excavations souterraines. Une revue des différentes méthodes d'échantillonnage des faces rocheuses, effectuée par Hadjigeorgiou et al. (1995), a démontré que les relevés par traverses usuels permettent d'amasser l'essentiel de l'information structurale nécessaire: la position des discontinuités le long de la traverse, la longueur des traces des discontinuités ainsi que leur orientation. Des contraintes de temps, de production et de sécurité rendent difficile l'utilisation de cette méthode de manière régulière. La majorité des mines ne disposent pas des données de terrain nécessaires pour réaliser une conception optimale des excavations. Par conséquent, la conception des ouvrages miniers doit être réalisée à partir d'une connaissance limitée du massif rocheux à excaver. Le besoin de disposer d'une quantité plus importante de données de qualité a d'ailleurs été souligné à plusieurs reprises ces dernières années, à l'occasion des colloques en contrôle de terrain de l'Association minière du Québec.

Les techniques d'analyse d'images sont actuellement utilisées dans divers domaines industriels (génie chimique, électronique, métallurgie,...). Par rapport à la méthode traditionnelle de relevé de discontinuités par traverses, l'analyse d'images offre de nombreux avantages. Tout d'abord, le temps nécessaire à l'acquisition des données est fortement réduit. Du point de vue de la géomécanique, le plus grand nombre de données récoltées augmente également la qualité de l'information disponible pour caractériser la masse rocheuse dans les différentes zones de l'exploitation. En ce qui concerne la gestion de l'information, cette approche permet la création d'une base de données permanente et accessible aux différents intervenants. De plus, un tel système est simple à implanter comme opération de routine car elle requiert peu de formation et de qualifications de la part du personnel. Enfin, l'analyse d'images de parois rocheuses réduit l'exposition des travailleurs à des situations potentiellement dangereuses et contribue donc directement à l'amélioration de la sécurité dans les mines.

Un système rapide et sécuritaire de récolte d'informations permettant de caractériser adéquatement la fracturation du massif rocheux, basé sur l'analyse d'image, a été développé dans le cadre de ce projet. Cet outil permet la collecte d'un nombre suffisant de données sur le réseau de discontinuités tout en évitant à l'opérateur d'être directement exposé aux chutes de blocs instables. La population cible est le personnel des mines souterraines.

Le système développé consiste en un module de reconnaissance automatisée des discontinuités à partir de photographies de parois rocheuses, le module *Rockscan*. Une méthodologie pour la prise d'images en milieu souterrain a été élaborée afin de maximiser les performances de *Rockscan*. Un module de caractérisation de la fracturation, le module *Mapscan*, a également été développé afin de caractériser le massif rocheux à partir des résultats obtenus par *Rockscan*. Le système a été testé dans des environnements souterrains et en surface.

Les utilisateurs primaires sont les personnes impliquées dans la caractérisation des massifs rocheux (géologues, ingénieurs et techniciens). Les bénéficiaires sont toutes les personnes qui travaillent sous terre car l'objectif ultime du projet est d'assurer un environnement de travail sécuritaire.

Table des matières

1 INTRODUCTION 1

1.1 IMPORTANCE DU SUJET 1
1.2 ORIGINE 1
1.3 ORIGINALITÉ DE L'OBJET D'ÉTUDE 2
1.4 RAPPEL DES OBJECTIFS DE RECHERCHE 3

2 APPLICATION DE L'ANALYSE D'IMAGES À LA CARACTÉRISATION DES DISCONTINUITÉS DANS LES MASSIFS ROCHEUX 4

2.1 MÉTHODES MONOSCOPIQUES 5
2.2 MÉTHODES STÉRÉOSCOPIQUES 6
2.3 AUTRES MÉTHODES 8
2.4 CONCLUSIONS 8

3 MÉTHODES 9

3.1 STRUCTURE DU SYSTÈME D'ANALYSE D'IMAGES 9
3.2 SYSTÈME DE CONSTRUCTION AUTOMATISÉE DE LA CARTE DES TRACES 10
3.3 SYSTÈME DE CARACTÉRISATION DE LA FRACTURATION 14

4 RÉSULTATS 27

4.1 SYSTÈME D'ACQUISITION DE PHOTOGRAPHIES DES PAROIS ROCHEUSES 27
4.2 PROCÉDURE D'ÉCHANTILLONNAGE 28
4.3 DÉVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL DE CONSTRUCTION AUTOMATISÉE DE LA CARTE DES TRACES 31
4.4 DÉVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL DE CARACTÉRISATION DE LA CARTE DES TRACES 31
4.5 VALIDATION DU SYSTÈME 31

5 DISCUSSION 40

6 CONCLUSIONS 41

6.1 OBJECTIFS DU PROJET 41
6.2 TRAVAUX RÉALISÉS 41
6.3 CONTRIBUTION DES TRAVAUX RÉALISÉS 42
6.4 TRAVAUX FUTURS 43
6.5 APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS 43
6.6 RETOMBÉES ÉVENTUELLES 43

1 Introduction

1.1 Importance du sujet

Depuis 1994, 352 accidents provoqués par l'impact d'une roche provenant directement du massif rocheux ont été constatés dans les mines souterraines du Québec (A.P.S.M., 2000). Ces accidents sont responsables d'invalidités temporaires ou permanentes et peuvent causer dans certains cas le décès de la victime. En plus des dommages physiques qui en résultent, les coûts associés à ces incidents peuvent également être très importants. Présentement 14 mines souterraines sont en activité dans la province. Celles-ci emploient un nombre important de travailleurs dont la majorité opèrent sous terre. Ces travailleurs incluent des ingénieurs, des contractants et des mineurs.

1.2 Origine

Le chercheur principal et son équipe ont eu l'opportunité de travailler dans plusieurs mines (exemple: Hadjigeorgiou et al., 2000). Ils ont constaté que, malgré tous les avancements réalisés dans le domaine de la modélisation informatique, le problème majeur demeure la récolte d'informations fiables afin d'améliorer la conception des excavations souterraines. Une revue des différentes méthodes d'échantillonnage des faces rocheuses (Hadjigeorgiou et al., 1995) a démontré que les relevés par traverses usuels (Figure 1) permettent d'amasser l'essentiel de l'information structurale nécessaire: la position des discontinuités le long de la traverse, la longueur des traces des discontinuités ainsi que leur orientation.

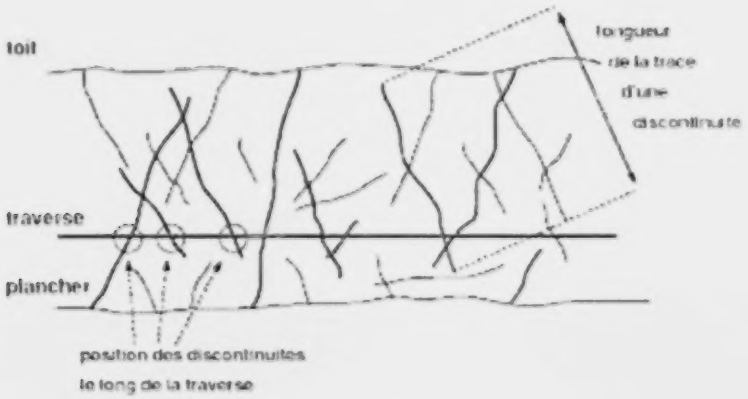


Figure 1. Relevés structuraux par traverses.

Certains inconvénients sont toutefois associés à la réalisation de ce type de relevé. Tout d'abord, sa mise en œuvre nécessite un temps considérable. De plus, l'accès aux parois rocheuses est souvent limité dans le temps et dans l'espace, et il est parfois impossible de retourner aux endroits échantillonnés pour compléter la base de données. C'est notamment le cas des mines qui utilisent

le béton projeté comme soutènement primaire. Ces contraintes de temps, de production et de sécurité empêchent donc l'utilisation de cette méthode de manière régulière. Une conséquence de cette situation est que la majorité des mines ne disposent pas des données de terrain nécessaires pour réaliser une conception optimale des excavations. Par conséquent, la conception des ouvrages miniers doit être réalisée à partir d'une connaissance limitée du massif rocheux à excaver. Le besoin de disposer d'une quantité plus importante de données de qualité a d'ailleurs été souligné à plusieurs reprises ces dernières années, à l'occasion des colloques en contrôle de terrain de l'Association minière du Québec.

1.3 Originalité de l'objet d'étude

À l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode capable d'amasser de manière simple et efficace un grand nombre de données structurales de façon sécuritaire. Le projet proposé vise premièrement à intégrer les dernières technologies d'analyse d'images à la collecte des données sur la fracturation des massifs rocheux. Le second objectif est le développement d'un système de caractérisation des masses rocheuses innovateur, fournissant au personnel minier des informations de qualité disponibles en tout temps afin de concevoir des excavations sécuritaires.

Les techniques d'analyse d'images sont actuellement utilisées dans divers domaines industriels (génie chimique, électronique, métallurgie,...). En génie minier, l'application la plus développée est l'analyse d'images d'empilements de blocs de roche. Cet outil permet de quantifier la fragmentation de la roche après le sautage ou le concassage. Les études les plus avancées dans ce domaine ont été réalisées par Maerz (1990), Kemeny et al. (1993) et Bedair (1996). Depuis 1994, plusieurs travaux ont également été entrepris dans ce domaine à l'Université Laval (Grenon et al., 1997). Plus récemment, St-Cyr et al. (2000) de l'École Polytechnique de Montréal ont proposé une méthodologie pour détecter et mesurer le déplacement de blocs de roche à l'aide de la combinaison d'images numériques. Plusieurs travaux ont également été menés afin d'examiner les discontinuités présentes au sein du massif rocheux. McCarter (1976) décrit une méthode utilisant des photographies de parois rocheuses prises dans une exploitation à ciel ouvert afin d'y reporter des éléments structuraux physiquement inaccessibles. Cette technique était alors considérée comme un outil pratique pour la recherche détaillée de zones potentiellement instables ainsi que pour le relevé régulier des discontinuités géologiques majeures. En effet, l'activité minière crée un changement constant de la topographie et requiert des mises à jour régulières de la cartographie de la mine.

Par rapport à la méthode traditionnelle de relevé de discontinuités par traverses, l'analyse d'images ne permet pas d'obtenir directement l'orientation des discontinuités. Par contre, elle offre de nombreux avantages pour la quantification des divers paramètres reflétant le taux de fracturation du massif rocheux et de la longueur des traces de discontinuités. Tout d'abord, le temps nécessaire à l'acquisition des données est fortement réduit. Du point de vue de la géomécanique, cette méthode permet de quantifier des paramètres décrivant plus adéquatement la fracturation de la roche, basés sur un échantillonnage surfacique du réseau de discontinuités. Ces paramètres ne peuvent être mesurés à l'aide de traverses. Le grand nombre de données récoltées augmente également la qualité de l'information disponible pour caractériser la masse rocheuse dans les différentes zones de l'exploitation. En ce qui concerne la gestion de l'information, cette approche permet la création d'une base de données permanente et accessible aux différents intervenants. De plus, un tel système est simple à implanter comme opération de routine car elle

requiert peu de formation et de qualifications de la part du personnel. Enfin, l'analyse d'images de parois rocheuses réduit l'exposition des travailleurs à des situations potentiellement dangereuses et contribue donc directement à l'amélioration de la sécurité dans les mines.

1.4 Rappel des objectifs de recherche

L'objectif de ce projet est de développer un système rapide et sécuritaire de récolte d'informations permettant de caractériser adéquatement la fracturation du massif rocheux. Cet outil doit permettre la collecte d'un nombre suffisant de données sur le réseau de discontinuités tout en évitant à l'opérateur d'être directement exposé aux chutes de blocs instables. La population cible est le personnel des mines souterraines. Les utilisateurs primaires sont les personnes impliquées dans la caractérisation des massifs rocheux (géologues, ingénieurs et techniciens). Les bénéficiaires sont toutes les personnes qui travaillent sous terre car l'objectif ultime du projet est d'assurer un environnement de travail sécuritaire.

L'analyse d'images de parois rocheuses est utilisée dans le cadre de ce projet car elle apparaît comme une technique appropriée pour atteindre ces objectifs. En effet, l'acquisition d'images est rapide et permet d'opérer à une certaine distance de la paroi étudiée. En outre, elle procure une quantité importante de données qui, par la suite, sont disponibles et accessibles en tout temps. Plusieurs tentatives d'application de l'analyse d'images à la caractérisation des massifs rocheux sont rapportées dans la littérature mais aucune d'elles n'est capable de combiner la rapidité, les performances et la simplicité requises pour devenir un outil adéquat pour une exploitation minière. La situation actuelle est donc limitée par deux contraintes: l'absence d'un équipement commercial facilitant la collecte des données, ainsi que l'absence de méthodes géomécaniques pouvant être intégrées à un tel équipement. Des travaux à l'université Laval ont avancé une méthodologie pouvant remplir ces conditions (Lemy et Hadjigeorgiou, 2003). Le projet vise à utiliser cette méthodologie afin de créer un système permettant l'acquisition, le traitement et l'analyse d'images de parois rocheuses pour diverses conditions de terrain. L'information acquise peut ensuite être traitée hors du site à l'aide d'un ordinateur. Le prototype développé sera ainsi capable de caractériser la fracturation du massif rocheux tout en étant compatible avec les contraintes de sécurité et de production de l'industrie minière. Le système n'exige aucune connaissance informatique spécifique de la part de l'opérateur. De plus, les compétences requises pour les travaux de terrain sont également réduites puisque le matériel nécessaire à l'acquisition des images se limite essentiellement à une caméra numérique, une source de lumière et un instrument de mesure des distances.

Le projet proposé a comme but principal d'avancer la technologie et les techniques de caractérisation géomécanique. Il n'est pas prévu, dans le cadre de ces travaux, de créer un outil prêt à être distribué aux opérations minières. On cherchera, par contre, à développer un prototype qui sera susceptible d'être commercialisé et d'être mis à la disposition des mines lors d'une phase ultérieure.

2 Application de l'analyse d'images à la caractérisation des discontinuités dans les massifs rocheux

Avec l'avènement des techniques de numérisation des images, des algorithmes puissants de traitement des images ont été mis au point et sont actuellement utilisés pour de nombreuses applications scientifiques et industrielles. Deux approches ont été proposées à ce jour afin de procéder au relevé des discontinuités géologiques par le traitement d'images numériques. La première approche consiste à détecter les traces de discontinuités interceptant un forage (Côté, 2000; Lemy et al., 2001). La seconde méthode est la reconnaissance des traces créées par l'intersection entre une paroi rocheuse et un réseau de discontinuités. Une revue de littérature portant sur cette méthode est brièvement présentée dans ce paragraphe.

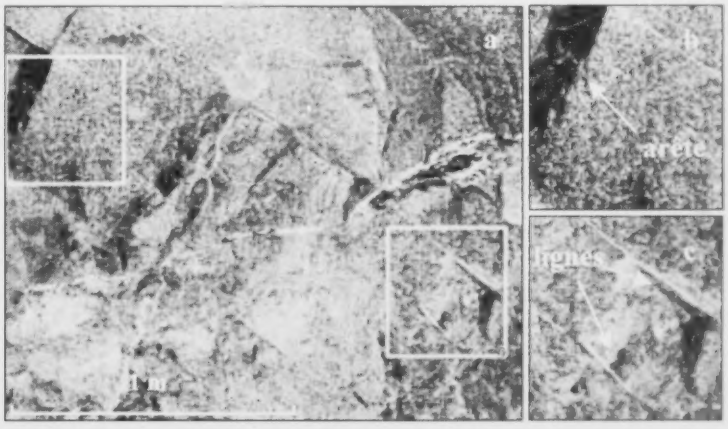


Figure 2. a) Paroi rocheuse typique (granodiorite); et b) et c) agrandissement de l'image illustrant la différence entre une ligne et une arête.

Une discontinuité peut apparaître de deux manières différentes aux abords d'une paroi rocheuse (Figure 2):

- Sous la forme d'une surface correspondant à une partie ou à la totalité d'une des deux faces de la discontinuité. Dans ce cas, lorsque la discontinuité n'est pas parallèle à la paroi, sa trace est représentée par l'arête engendrée par l'intersection entre la paroi et la face visible de la discontinuité (Figure 2b); ou
- Sous la forme d'une trace linéaire résultant de l'intersection entre la discontinuité et la paroi rocheuse (Figure 2c).

Du point de vue de l'analyse d'images, les termes ligne et arête peuvent être définis de la façon suivante :

- Arête : frontière entre deux régions d'une image caractérisées par des niveaux de gris distincts (Figure 2b); et
- Ligne : structure curvilinéaire rencontrée dans une image (Figure 2c).

Les études d'analyse d'images de parois rocheuses menées jusqu'à présent se divisent en deux grandes catégories : les méthodes monoscopiques qui utilisent une seule image de la paroi étudiée et les méthodes stéréoscopiques où les coordonnées de points sont obtenues dans les trois dimensions à l'aide de la combinaison de deux images de la même scène. Récemment, le laser a également été utilisé pour déterminer la position tridimensionnelle des points d'une paroi.

2.1 Méthodes monoscopiques

Les méthodes monoscopiques requièrent l'utilisation d'une seule image pouvant être obtenue à l'aide d'une caméra vidéo ou d'un appareil photographique. Tsoutrelis et al. (1990) caractérisent la fracturation de roches volcaniques dans une mine souterraine en traçant manuellement les traces de discontinuités à l'aide de photographies. À chaque site, six photographies sont prises couvrant chacune une fenêtre carrée de 3m de coté. Une surface d'échantillonnage est ensuite sélectionnée à partir de ces images. L'inclinaison, le profil de rugosité et la longueur des traces ainsi que l'espacement entre les discontinuités sont mesurés. L'orientation des discontinuités ne peut être calculée puisqu'une seule image de la paroi rocheuse est prise en compte. Pour obtenir cette information, Crosta (1997) combine les informations obtenues sur deux photographies de parois d'orientations différentes dans une carrière. Il détermine également le degré de fracturation, l'espacement et la taille des discontinuités. Les traces sont toutefois détectées visuellement et numérisées à la main par l'opérateur, aidé par les observations effectuées sur le terrain. Il recommande que les travaux de terrain et de bureau soient réalisés par la même personne. Crosta estime que le temps nécessaire à la numérisation manuelle d'une image varie de 30 à 90 minutes en fonction du nombre de traces et de la taille de la surface étudiée. Ce temps peut donc devenir important lorsque plusieurs images doivent être analysées.

Afin d'éliminer les efforts nécessaires et le temps consacré à la numérisation manuelle ainsi que les erreurs dues à la subjectivité des opérateurs, des procédés automatiques de reconnaissance de la trace des discontinuités ont été mis au point. Maerz (1990) élabore un outil d'analyse et de détection automatique des traces de discontinuités. Le traitement de l'image est essentiellement basé sur un algorithme de détection de lignes développé par Dony (1988). L'existence de traces représentées par des arêtes n'est donc pas considérée. Le système développé est testé à l'aide d'un seul cas d'étude réalisé dans une galerie d'une mine souterraine d'Abitibi, à partir d'un assemblage de 4 photographies de 2 x 1.5 m et de 8 photographies de 1 x 0.75 m. Un éclairage placé de manière à mettre en évidence les traces est utilisé lors de ces travaux. Les paramètres mesurés sont l'inclinaison des traces des discontinuités, leur espacement et le RQD. Seule la valeur du RQD, variant de 94 à 98% et de 80 à 94% selon la taille de la photographie, est comparée avec la valeur estimée par le personnel, qui est de l'ordre de 90%. Il y a donc un effet d'échelle important sur les résultats obtenus. On ne peut cependant attribuer cet effet à la variation de l'ouverture des discontinuités identifiées, car rien n'indique que les lignes détectées sont liées à la présence de discontinuités. En outre, 97% des lignes identifiées sur les images sont attribuées à une même famille de traces. Il s'agit d'une situation particulière, généralement rencontrée lorsque la roche est foliée. Il est donc difficile de tirer des conclusions à propos des performances réelles de ce système testé pour une situation particulière, avec un seul type de discontinuité et de roche.

Observant que plusieurs traces détectées sont incomplètes et que certains segments ne correspondent à aucune discontinuité réelle, Reid et Harisson (2000) jugent insatisfaisantes les

cartes de traces de discontinuités obtenues par Maerz. C'est pourquoi ils proposent un algorithme permettant le traçage semi-automatique des discontinuités à partir d'une image en tons de gris numérisée. La méthode utilisée attribue à chaque pixel un niveau d'illuminance sur une échelle de 0 à 255 permettant de considérer la paroi rocheuse comme une surface topographique. Sur cette surface, les pixels sombres correspondent à de basses élévations et les pixels clairs à de hautes élévations. Les traces de discontinuités représentées par des lignes dans l'image sont ensuite assimilées à des ravins caractérisés de part et d'autre par des pentes abruptes. Le cas d'étude utilisé pour décrire cet algorithme est une image représentant une surface d'environ 0.5 par 0.5 m, montrant un petit nombre de discontinuités de grande ouverture dont la trace apparaît clairement sur la photographie (Figure 3a).

a) b) c)

Figure 3. a) Exemple d'image analysée par Reid et Harisson (2000); b) résultat de la détection automatique; et c) résultat suite à la reconstruction semi-automatique des traces et à l'élimination des segments non reconstruits.

L'image est soumise à une série de traitements résultant en l'image binaire de la Figure 3b. Enfin, une routine est développée afin de permettre à l'utilisateur de relier entre eux les segments d'une même trace. Le résultat final est présenté à la Figure 3c où les segments non reliés sont éliminés. Cet algorithme est validé à l'aide de deux autres images de la même paroi que celle de la Figure 3a, et d'une image provenant d'une carrière à ciel ouvert. La fiabilité et la robustesse de cet algorithme n'ont toutefois pas été évaluées à plus grande échelle, avec différents types de roches et de discontinuités. Ses performances n'ont pas non plus été comparées à celles du système proposé par Maerz (1990).

2.2 Méthodes stéréoscopiques

La stéréoscopie permet de restituer l'impression du relief à partir de la fusion de deux images planes. Allam (1978) utilise la combinaison de deux images d'une même paroi, prises de deux stations munies de théodolites afin d'estimer la position, la rugosité et l'orientation des fractures observées. Les coordonnées d'au moins quatre points par fracture sont déterminées à l'aide d'une table numérisante et d'un stéréoscope. Ces coordonnées servent ensuite à calculer l'équation du plan de la discontinuité étudiée. Plus récemment, Baratin et al. (1990), Blackwell et Klingmann (1999), ainsi que Grobler et al. (2003) utilisent le même principe de combinaison de deux photographies afin de mesurer l'orientation de discontinuités recoupant des pentes difficilement accessibles.

Hagan (1980) propose une méthode identique pour le relevé de discontinuités dans les mines souterraines. En effet, il juge un tel outil particulièrement utile dans les zones où la fracturation naturelle ou induite par le minage est relativement dense ou de nature complexe. Ainsi, la direction et le pendage des fractures visibles sur l'image peuvent être calculés à partir de points localisés à l'aide d'une table numérisante, d'un stéréoscope et d'un simple algorithme. Selon Hagan, le temps nécessaire au relevé des discontinuités est diminué de 90% grâce à cette approche. Pour calculer les coordonnées d'un point dans les trois dimensions à l'aide de deux images, il faut d'abord déterminer sa position dans chacune d'elles. Hagan effectue la correspondance entre les différentes paires de points manuellement. Dans ce cas, le temps requis pour le traitement des données de terrain est important.

Afin d'automatiser cette opération, Cheung et al. (1996) utilisent un système plus complexe où un faisceau lumineux balaie la paroi rocheuse. L'image de la paroi est alors acquise par une paire de caméras vidéo de positions et d'orientations connues. Un tel dispositif permet de déterminer la géométrie en trois dimensions de l'objet balayé. L'appareillage utilisé est cependant assez complexe puisqu'il comprend une lampe munie d'un miroir parabolique, montée sur un support motorisé pouvant tourner sur lui-même, un contrôleur pour positionner la source lumineuse, deux caméras CCD, un dispositif pour numériser les images et un PC. Ce système est également muni d'un logiciel permettant de traiter les données acquises. Les résultats obtenus sont la projection stéréographique des discontinuités détectées, les graphes représentant la distribution de l'espacement, de la taille et de la surface des joints. Plus récemment, Gaich et al. (2004) ainsi que Grober et al. (2003) ont utilisé des systèmes automatisés de construction d'images tridimensionnelles de parois rocheuses également basés sur la combinaison de plusieurs images digitales d'un même objet. La construction des images 3D se réalise en plusieurs étapes incluant : 1) la calibration de l'appareil photographique; 2) la détermination de la position et de l'orientation de l'appareil; 3) l'identification de points correspondants au sein des deux images; 4) le calcul des coordonnées 3D des points identifiés; 5) la construction d'une surface 3D à partir de ces coordonnées; 6) la superposition des couleurs sur le modèle tridimensionnel construit. Les images acquises sont utilisées pour obtenir une représentation tridimensionnelle de la face de tunnels ou de parois rocheuses dans des exploitations à ciel ouvert. Les structures majeures visibles dans l'image sont ensuite tracées manuellement et leurs caractéristiques géométriques sont mesurées.

L'utilisation de la stéréoscopie offre l'avantage de pouvoir déterminer les coordonnées en trois dimensions de points appartenant à la paroi rocheuse étudiée. Ces coordonnées peuvent ensuite être utilisées pour calculer l'orientation des discontinuités à condition qu'une partie suffisante d'une des deux surfaces de la discontinuité soit visible dans l'image. En effet, l'orientation ne peut être mesurée lorsque la trace des discontinuités est représentée par une ligne dans l'image puisqu'une droite peut appartenir à une infinité de plans. De plus, la construction d'images tridimensionnelles peut s'avérer complexe et requérir des compétences dans le domaine de la photogrammétrie. La mise en correspondance de points identiques dans des images différentes est une opération parfois difficile à effectuer. En outre, il est souvent nécessaire de disposer d'au moins un point de référence visible dans les deux images et dont la position est connue avec exactitude. Enfin, notons qu'aucune des études mentionnées ci-dessus ne propose une détection automatisée et exhaustive de la carte des traces de discontinuités. Notons enfin que les travaux

publiés à ce jour ne permettent pas d'évaluer la fiabilité et les performances réelles de cette méthode.

2.3 Autres méthodes

Feng et al. (1999, 2003) utilisent une station totale afin de calculer les coordonnées de points appartenant à des faces de discontinuités. Cette approche leur permet de mesurer l'orientation et la rugosité des discontinuités. La technique n'offre cependant pas la possibilité d'effectuer un relevé systématique de l'information disponible dans l'affleurement car l'acquisition des données est relativement lente. Récemment, la technologie du laser s'est imposée dans l'industrie minière afin de déterminer la forme et le volume des chantiers suite au sautage. Ce système permet d'obtenir directement les coordonnées en trois dimensions de séries de points sur une paroi rocheuse. Une méthode d'interpolation permet ensuite de reconstituer une image tridimensionnelle de cette paroi. Par rapport aux méthodes stéréoscopiques, le laser ne nécessite pas l'appariement de points appartenant aux deux images exploitées. Cette approche pourrait également être mise à profit dans le but de caractériser les réseaux de discontinuités. C'est pourquoi, plusieurs chercheurs (Slob et al., 2002; Kemeny et al., 2003) ont mené des travaux dans le but de calculer l'orientation des discontinuités dont une des faces affleure sur la paroi. Le laser permet également de disposer, pour chaque point enregistré, d'une valeur de l'intensité réfléchie par la surface en ce point. Il n'est cependant pas évident que cette information soit utile à la détection des traces. Des méthodes sont actuellement développées afin de superposer une image bidimensionnelle prise avec un appareil numérique à l'image tridimensionnelle obtenue avec le laser. Bien que prometteuse, la technologie du laser requiert des équipements encombrants et très dispendieux.

2.4 Conclusions

Cette revue bibliographique a mis en évidence l'existence de plusieurs méthodes d'analyse d'images appliquées à l'échantillonnage des discontinuités. Pour être jugées efficaces, ces méthodes doivent répondre à plusieurs critères:

- La quantité et précision des données acquises;
- La taille, coût et complexité de l'équipement requis; et
- La rapidité avec laquelle le relevé est effectué.

Les méthodes stéréoscopiques et le laser permettent de calculer les coordonnées en trois dimensions de points décrivant une scène. Cette information est mesurée directement sur le terrain à l'aide du laser. Par contre, la détermination de la position tridimensionnelle de points à partir de deux images d'une même paroi est indirecte et rencontre plusieurs difficultés. Ces données servent ensuite à calculer l'orientation des discontinuités à condition que plusieurs points non alignés d'une de leurs faces soient accessibles. Cependant, les dispositifs utilisés peuvent être encombrants et le temps requis pour l'installation, la mise au point ainsi que l'acquisition peut être relativement important. Ils sont donc moins adaptés à des applications courantes dans le cadre d'exploitations souterraines. En outre, les systèmes laser sont encore très dispendieux. Plusieurs études visant à utiliser l'approche stéréoscopique afin de caractériser les réseaux de discontinuités sont mentionnées dans la littérature. Cette technique n'est toutefois pas employée pour des opérations de routine dans l'industrie minière.

Quelle que soit la méthode d'acquisition des images utilisée pour décrire la scène, la reconnaissance visuelle des discontinuités oblige l'utilisateur à construire manuellement la carte des traces visibles sur les photographies. Toutefois, cette opération augmente considérablement le temps consacré et les efforts fournis pour caractériser la fracturation du massif rocheux. Par conséquent, le développement d'une méthode de reconnaissance automatisée des traces de discontinuités dont les résultats peuvent être vérifiés et complétés par un opérateur semble un bon compromis entre le temps nécessaire à l'analyse et sa fiabilité.

Maerz (1990) et Reid et Harrison (2000) ont démontré le potentiel de cette approche. Cependant, les algorithmes proposés ont été validés sur un nombre très restreint de cas d'études à petite échelle. En outre, dans tous les cas étudiés, les traces de discontinuités sont présentes sous la forme de lignes de teinte sombre. Or, les traces réelles peuvent également être décrites soit par des arêtes ou par des lignes de teintes plus claires. De plus, l'erreur engendrée par l'application de ces techniques n'a pas été évaluée de manière quantitative. Dans ces conditions, il était difficile de juger la robustesse et la fiabilité des travaux réalisés à ce jour.

Des travaux menés par les auteurs ont permis de déterminer les points forts et les faiblesses de divers algorithmes de détection de lignes et d'arêtes (Hadjigeorgiou et al., 2003). Ces algorithmes ont été appliqués à une série d'images de parois provenant de mines du bouclier canadien. Cette étude a permis de conclure que les approches de Maerz et de Reid et Harrison ne sont applicables que pour un nombre limité de cas rencontrés dans les mines souterraines pour lesquels d'autres méthodes semblent plus adaptées. Cette étude a également permis d'identifier les étapes complémentaires nécessaires pour développer un outil de reconnaissance robuste et fiable (Lemy et Hadjigeorgiou, 2003).

D'autre part, les seules applications pratiques des paramètres mesurés à l'occasion des études décrites dans cette revue bibliographique sont le calcul du RQD, de la rugosité et l'évaluation de l'influence de l'orientation des discontinuités sur la stabilité d'un ouvrage souterrain de direction donnée. Par conséquent, il est également nécessaire de développer davantage les méthodes de caractérisation géomécanique basées sur l'analyse d'images de paroi rocheuses.

3 Méthodes

3.1 Structure du système d'analyse d'images

Pour répondre aux objectifs du projet, le système prototype doit être capable d'effectuer les trois tâches suivantes:

1. Acquérir des images de parois rocheuses en tenant compte des contraintes de temps et d'accès de l'industrie minière;
2. Construire de façon automatisée la carte des traces à partir des images acquises sur le terrain; et
3. Caractériser la fracturation des masses rocheuses à partir de sections bidimensionnelles des réseaux de discontinuités.

Le système a donc été décomposé en plusieurs étapes illustrées à la Figure 4. Lors des travaux de terrain, des images de parois rocheuses sont prises à l'aide de l'appareil photographique placé sur un trépied. Quelques informations à propos de la géologie, de la position de la paroi et de l'appareil photographique sont également notées. De retour dans un environnement de travail adéquat, les images sont transférées à un ordinateur pour être traitées afin d'en extraire les cartes de traces de discontinuités. Ces cartes sont finalement analysées pour caractériser la fracturation du massif rocheux à l'aide des données récoltées sur le terrain. La suite de cette section présente les bases théoriques sur lesquelles sont fondées la construction automatisée de la carte des traces ainsi que la caractérisation du réseau de discontinuités.

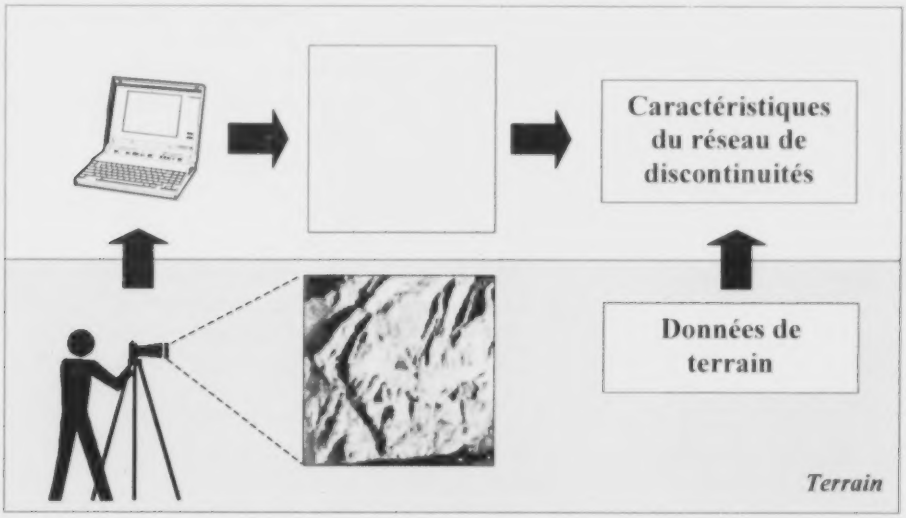


Figure 4. Étapes du système d'analyse d'images développé.

3.2 Système de construction automatisée de la carte des traces

Le système de construction automatisée de la carte des traces a été implanté en se basant sur la méthodologie développée au laboratoire de mécanique des roches lors de travaux préliminaires (Hadjigeorgiou et al., 2003; Lemy et Hadjigeorgiou, 2003). Une étude de détecteurs de lignes et d'arêtes a montré qu'aucun algorithme de segmentation ne peut être utilisé seul afin de construire la carte des traces de discontinuités (Hadjigeorgiou et al., 2003). Elle a également permis d'identifier les traitements complémentaires nécessaires à l'élaboration d'un outil d'analyse d'images opérationnel. La méthodologie développée, illustrée à la Figure 5, est basée sur ces enseignements. Cet outil doit être capable de fournir une représentation fidèle de la scène tout en minimisant le degré d'intervention de l'utilisateur. Pour y parvenir, les étapes suivantes ont été intégrées à la méthodologie :

1. L'acquisition;
2. Le prétraitement;
3. La segmentation;
4. La représentation et la description;
5. La reconnaissance; et
6. L'interprétation.

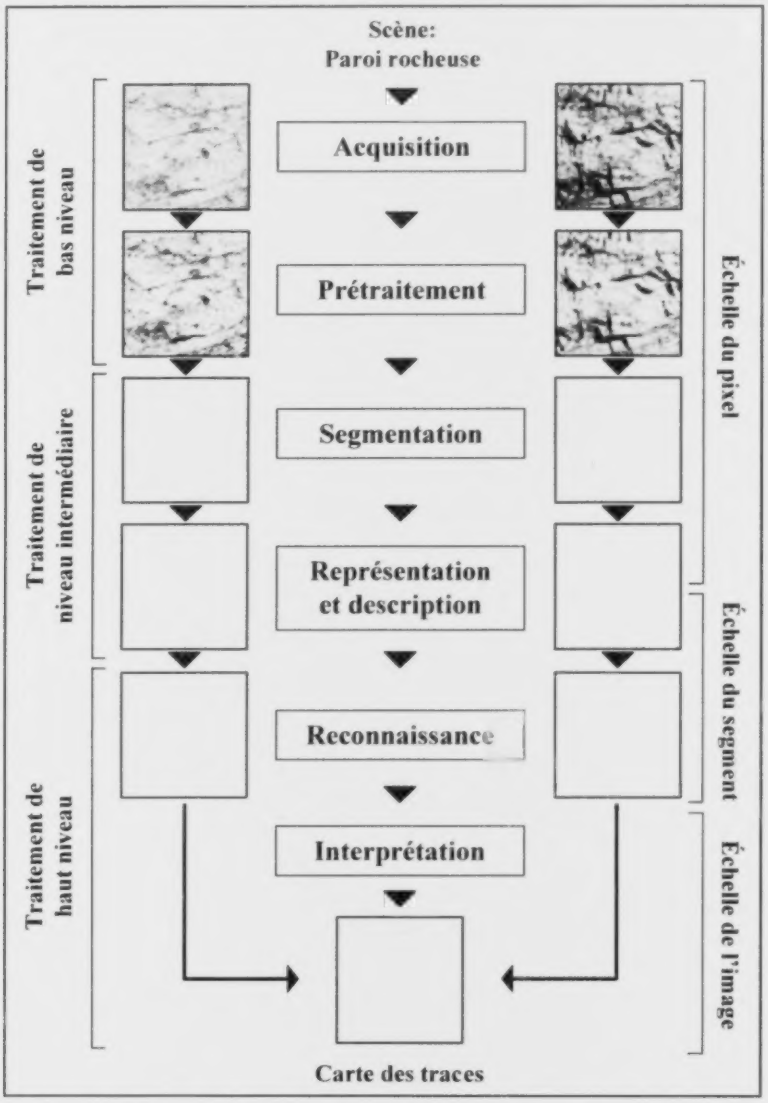
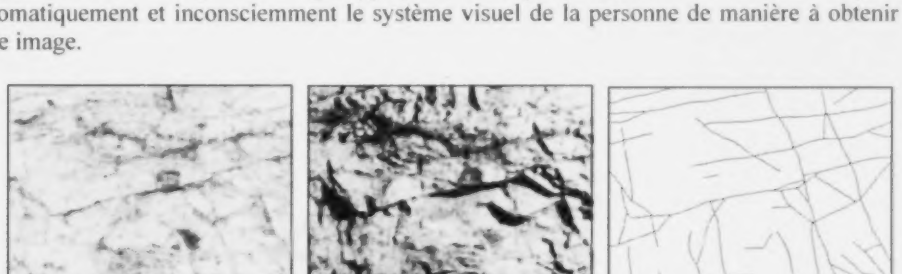


Figure 5. Organigramme de la méthodologie de construction de la carte des traces.

Gonzalez et Woods (2002) proposent de classer ces étapes en fonction du niveau d'intelligence nécessaire pour obtenir le résultat souhaité. Ce niveau augmente à mesure que l'on progresse dans les différents stades de la méthodologie. Cette évolution est étroitement liée à la taille des éléments traités. Dans les premières étapes, l'image est parcourue en examinant le voisinage de chacun des pixels. Ensuite, l'information traitée est la liste des chaînes de pixels rencontrés dans une image binaire. Finalement, la dernière étape du traitement identifie les liens pouvant exister entre plusieurs chaînes de pixels. L'échelle d'observation augmente donc tout au long du processus, tel un observateur s'éloignant peu à peu de la paroi étudiée. Ces différentes étapes sont brièvement décrites dans la suite du texte. Plus de détails sur les différents algorithmes sont donnés dans Lemy et Hadjigeorgiou (2003).

Traitement de bas niveau

Les deux premières phases du traitement, l'acquisition et le prétraitement des images, sont considérées comme des opérations de bas niveau. Elles peuvent être comparées au processus d'adaptation d'une personne essayant de trouver dans l'obscurité d'un théâtre un siège inoccupé immédiatement après avoir été exposée à la lumière du jour. La procédure de détection du siège ne peut débuter tant qu'une image appropriée n'est pas disponible. Le cerveau adapte alors automatiquement et inconsciemment le système visuel de la personne de manière à obtenir une telle image.



a) b) c)

Figure 6. Photographies d'une paroi rocheuse dans une mine souterraine prises avec un éclairage. a) Normal à la paroi; b) oblique par rapport à la paroi; et c) carte des traces de discontinuités.

Acquisition

La première étape du processus est l'acquisition des images. La Figure 6 est une photographie de paroi rocheuse d'une galerie de mine souterraine. La seule source de lumière utilisée dans ce cas est un flash normal à la paroi rocheuse. Si on compare cette image avec la Figure 6c représentant la carte des traces des joints dessinée manuellement, on constate qu'une grande partie des discontinuités interceptant la paroi sont difficiles à identifier visuellement. En effet, dans ce cas, plusieurs joints sont identifiés grâce aux contrastes générés le long de l'arête décrivant l'intersection entre une de leurs faces et la paroi. Or, les contrastes créés le long de ces arêtes sont

relativement faibles lorsque l'éclairage est perpendiculaire à la surface étudiée. La Figure 6b illustre une photographie prise avec un éclairage dont la direction est oblique par rapport à la paroi. Elle montre clairement qu'il suffit d'écarter la direction de la source lumineuse de la normale à la paroi pour faciliter grandement l'identification visuelle de la trace de plusieurs joints. Ces images révèlent également qu'un éclairage oblique ne favorise pas la reconnaissance des joints identifiables par la présence d'un remplissage de teinte différente par rapport à celle de la roche. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser une source de lumière normale à la paroi afin d'éviter que des zones d'ombre n'occultent la présence de ces traces.

Par conséquent, des photographies prises avec un flash normal à la paroi (partie gauche de l'organigramme de la Figure 6) et des éclairages obliques de différentes directions (partie droite de l'organigramme de la Figure 6) sont acquises sur le terrain. Ces images peuvent être prises directement sous forme numérique ou peuvent être numérisées par la suite. Quel que soit l'équipement utilisé, les photographies sont converties en images monochromatiques avant le début du traitement.

Prétraitement

Le prétraitement des images consiste à améliorer les images acquises afin d'augmenter les chances de succès des traitements ultérieurs. Des techniques d'ajustement de l'illuminance et de filtrage sont utilisées dans le système développé.

Traitement de niveau intermédiaire

Le traitement de niveau intermédiaire consiste, dans un premier temps, à extraire les régions ou les objets pertinents des images résultant du traitement de bas niveau. Ensuite, les objets extraits sont caractérisés afin d'en obtenir la meilleure description possible. Dans ce cas, un comportement intelligent adapté à notre problématique doit être inculqué aux procédures développées. Les différentes étapes du traitement de niveau intermédiaire utilisées dans la méthodologie sont la segmentation, la représentation et la description.

Segmentation

L'objectif de la segmentation d'une image de paroi rocheuse est d'obtenir une image binaire constituée d'objets décrivant au mieux la trace des discontinuités interceptant cette paroi. Étant donné les différentes formes sous lesquelles ces traces peuvent apparaître dans l'image, des algorithmes de détection d'arêtes et de lignes sont employés pour réaliser cette opération. Cette étape est particulièrement importante puisqu'elle détermine le nombre et l'importance des corrections qui devront être apportées par la suite.

Représentation et description

La représentation permet de convertir les objets de l'image binaire en chaînes de pixels de largeur minimale appelées segments. Chaque segment est alors représenté sous la forme d'un vecteur dont les éléments correspondent aux pixels appartenant à ce segment. L'information traitée à ce stade n'est donc plus une image mais une liste de vecteurs à partir desquels, on peut calculer une série de paramètres décrivant les segments.

Traitement de haut niveau

Un traitement de haut niveau est utilisé pour reconnaître et interpréter l'information acquise lors des étapes précédentes. À ce stade, le système devient suffisamment spécialisé pour atteindre l'objectif fixé. Étant donné leur complexité, les problèmes rencontrés à ce niveau sont résolus en faisant appel à l'intelligence artificielle et à l'intervention de l'utilisateur. En effet, alors que les traitements précédents (excepté l'acquisition) sont réalisés de manière automatique, une option semi-automatique est introduite pendant l'étape d'interprétation.

Reconnaissance

Lors de la reconnaissance, une étiquette est attribuée à chaque segment de l'image binaire. Cette opération est réalisée à l'aide de réseaux de neurones artificiels. Ces réseaux utilisent les caractéristiques calculées lors de la description pour déterminer si un segment est attribuable à la présence d'une trace de discontinuité ou à un autre phénomène. La classification des segments permet de conserver uniquement l'information pertinente pour la construction de la carte des traces. Ces réseaux doivent être entraînés à distinguer les segments décrivant des traces des autres segments. Cet entraînement constitue une part importante des travaux de développement.

Interprétation

La dernière phase du traitement est l'interprétation. Cette étape consiste à donner une signification à un ensemble d'objets reconnus. Dans notre cas, l'interprétation revient à décider si plusieurs segments appartiennent à une seule trace. Le cas échéant, les segments sont reliés entre eux et un nouveau vecteur les englobant est créé dans la liste. Les coordonnées des pixels inscrites dans la version finale de la liste de segments sont ensuite utilisées pour construire la carte des traces de discontinuités.

3.3 Système de caractérisation de la fracturation

L'analyse des cartes permet de mesurer les caractéristiques géométriques du réseau de traces extraites lors du traitement des images. Ainsi, la connaissance de la surface de paroi rocheuse couverte par un pixel de l'image permet de mesurer des informations telles que la longueur et l'inclinaison des traces ou encore la distance entre deux traces le long d'une droite de position et d'inclinaison données. Ces données sont ensuite utilisées afin de calculer des paramètres décrivant adéquatement les réseaux de discontinuités tels que la fréquence, l'espacement et la longueur des discontinuités ou encore le degré de fracturation de la roche.

Les méthodes généralement utilisées afin de quantifier les informations utiles à l'ingénieur en contrôle de terrain utilisent un échantillonnage linéaire. Or, étant donné le caractère tridimensionnel des réseaux de discontinuités, le taux de fracturation calculé le long d'un forage ou d'une traverse est fortement influencé par la direction de l'échantillonnage. L'analyse des cartes de traces réduit ce biais car elle permet la mesure directe de paramètres reflétant le niveau de fracturation de sections du massif rocheux. Les valeurs obtenues se rapprochent donc de la réalité spatiale des réseaux de fractures. Cependant, les méthodes d'analyse des données provenant d'un échantillonnage linéaire ne peuvent être utilisées pour exploiter pleinement

l'information extraite par traitement de l'image. Il était donc nécessaire d'utiliser ou de développer de nouvelles méthodes de traitement des données adaptées aux cartes de traces de discontinuités.

Le système de caractérisation développé dans le cadre du projet est illustré à la Figure 7. Il utilise comme données d'entrée les cartes de traces ainsi que l'orientation d'un nombre limité de discontinuités représentatives de chacune des familles identifiées sur le terrain. Il fournit ensuite deux types d'informations à propos des réseaux de discontinuités qui peuvent être utiles lors des travaux de conception des excavations. La première catégorie quantifie la qualité du massif rocheux sous la forme d'un indice de fracturation, ou encore en estimant la variabilité de la taille des blocs qui le constituent. Le taux de fracturation est une caractéristique importante car elle détermine grandement le comportement des massifs rocheux aux abords des excavations. Cette importance explique le grand nombre de paramètres suggérés dans la littérature. Ces indices permettent de classifier les différentes zones de l'exploitation. La seconde catégorie consiste à décrire la distribution des caractéristiques géométriques des familles de discontinuités. La connaissance de ces propriétés permet de générer un modèle du réseau de discontinuités qui peut être utilisé, par exemple, à des fins de dimensionnement du soutènement requis.

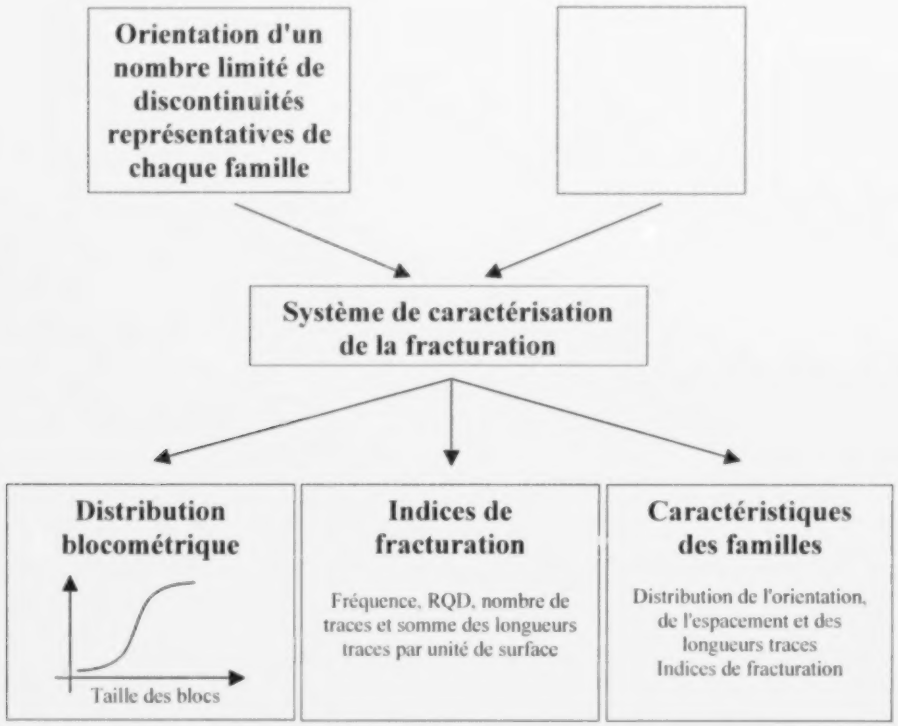


Figure 7. Système de caractérisation de la fracturation à partir de l'analyse de cartes de traces.

Quantification de la fracturation

Détermination de la distribution blocométrique

Une manière de quantifier la fracturation d'une masse rocheuse est d'estimer la distribution de la taille des blocs qui le constituent. Selon Kleine (1988), la grandeur de la distance intacte dans une masse rocheuse est proportionnelle au volume des blocs. Cette hypothèse est utilisée lors de plusieurs travaux visant à déterminer la distribution des volumes des blocs à partir de réseaux de discontinuités tridimensionnels simulés (Villaescusa, 1991; Grenon, 2000). Dans ces approches, les volumes sont calculés en mesurant l'espacement entre les traces dans des sections aléatoires du massif rocheux le long de traverses de position et d'inclinaison aléatoires. La même démarche est réalisée dans le cadre de ce projet (Figure 8). En effet, mesurant l'espacement total des discontinuités à partir de traverses fictives parallèles horizontales et verticales, Tsoutrelis et al. (1990) a mis en évidence le biais qui est provoqué lorsque la direction des traverses est imposée. Il est important de noter que, par rapport aux travaux de Villaescusa (1991) et Grenon (2000), les sections utilisées dans notre cas sont imposées par la configuration des excavations accessibles.

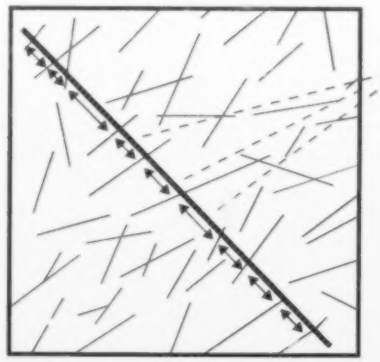


Figure 8. Mesure de l'espacement entre les traces dans des sections du massif rocheux le long de traverses de position et d'inclinaison aléatoires.

Deux types d'informations peuvent ensuite être obtenus:

- La variation spatiale de l'espacement moyen total, représentée à l'aide d'une rosette (Figure 9b). Ce diagramme permet de représenter l'anisotropie de la fracturation; et
- La distribution et la moyenne de l'espacement total caractérisant le patron de traces observé dans la fenêtre analysée (Figure 9c).

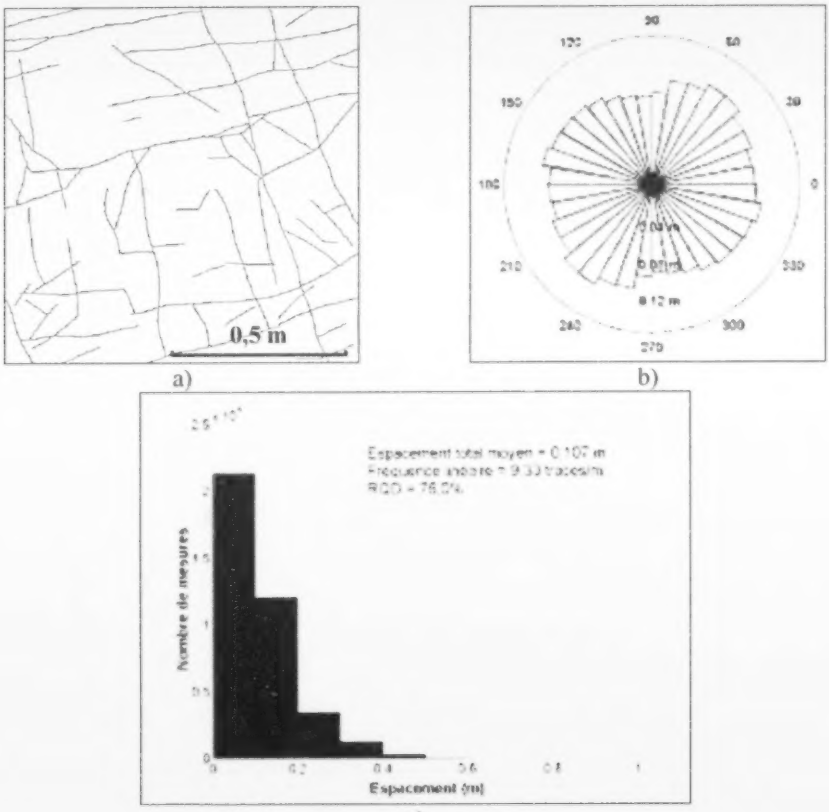


Figure 9. a) Carte des traces; b) rosette de la variation spatiale de l'espacement total moyen; et c) distribution des espacements totaux.

Il est toutefois nécessaire de déterminer le nombre suffisant de traverses d'inclinaison et de positions aléatoires qui doivent être générées pour obtenir une valeur représentative du patron de traces. Ce nombre peut être estimé à l'aide de la méthode proposée par Priest (1993), qui utilise le théorème de la limite centrale. Ce théorème indique que la valeur moyenne $\overline{X}$ de n échantillons pris aléatoirement dans une population de distribution quelconque, de moyenne μ_x et de variance σ_x^2, va tendre vers une distribution normale de moyenne μ_x et de variance σ_x^2/n. La précision de l'approximation augmente donc avec le nombre d'échantillons. Supposant que les espacements obéissent à une distribution exponentielle négative, on déduit l'expression suivante :

$$\text{Intervalle de confiance} = \overline{X} \pm \varepsilon \overline{X} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{z}{\sqrt{n}} \qquad \text{(Éq. 1)}$$

où $\overline{X}$ = valeur moyenne des n échantillons;
ε = erreur relative; et

z = valeur liée au niveau de confiance désiré.

Le nombre d'échantillons requis pour un niveau et un intervalle de confiance donné peut donc être obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$n = \left(\frac{z}{\varepsilon}\right)^2 \qquad \text{(Éq. 2)}$$

Dans ce travail, afin de limiter le temps de calcul, nous considérons acceptable une erreur sur l'espacement moyen inférieure à 5% dans 99% des cas. Ces exigences nécessitent la mesure de 2636 espacements. Des traverses sont donc générées jusqu'au moment où ce nombre est atteint.

Fréquence linéaire

La fréquence linéaire est un paramètre couramment utilisé pour représenter le taux de fracturation du massif rocheux. D'après Priest (1993), la meilleure estimation de la fréquence est l'inverse de la moyenne de l'espacement. On peut donc obtenir une valeur de la fréquence moyenne des traces interceptant une fenêtre (λ_s) à partir de l'espacement total moyen mesuré à l'aide de traverses aléatoires.

RQD

Le RQD (Rock Quality Designation) est le premier indice utilisé afin de quantifier et de classifier la fracturation de la masse rocheuse (Deere et Deere, 1988). Il s'agit d'un paramètre très populaire qui est d'ailleurs repris dans les deux systèmes de classification NGI et RMR. La plupart du temps, il s'agit de la seule information disponible dans les mines à propos de la fracturation du massif rocheux (Milne et al., 1998). Le RQD est normalement évalué à partir de la longueur des segments de carottes de forage. Dans le système proposé, il est quantifié le long de traverses aléatoires balayant la carte des traces. Cette approche permet d'obtenir une valeur plus représentative de la fracturation du massif rocheux.

Intensités de la fracturation

Dershowitz et Herda (1992) proposent quatre paramètres reflétant l'intensité de la fracturation afin de décrire plus adéquatement les réseaux de discontinuités. Le premier est le nombre de centres de traces par unité de surface (P_{21}) et le second est la somme de la longueur des traces par unité de surface (P_{22}). Ces paramètres sont illustrés à la Figure 10. Leur évaluation est donc réalisée à l'aide de sections du massif rocheux. En outre, P_{22} semble être une bonne estimation du produit de la longueur trace moyenne et de P_{21} (Priest, 1993).

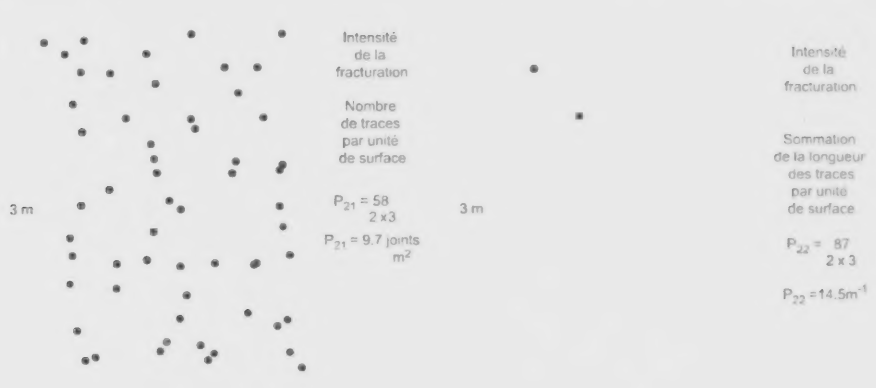


Figure 10. Intensités surfaciques de la fracturation. a) Nombre de centres de traces par unité de surface (P_{21}); et b) somme de la longueur des traces par unité de surface (P_{22}) (Grenon, 2000).

Les deux autres paramètres sont l'extrapolation en trois dimensions des deux premiers. Il s'agit du nombre de centres de discontinuités par volume unitaire (P_{31}) et de la somme des aires des discontinuités par unité de volume (P_{32}). D'après Dershowitz et Herda (1992), ce dernier paramètre est le plus approprié pour décrire la fracturation du massif rocheux car il caractérise à la fois la persistance des discontinuités et le degré d'intensité de la fracturation. De plus, il ne souffre d'aucun biais lié à la méthode d'échantillonnage ou aux propriétés structurales de la masse rocheuse.

Bien que ces intensités de fracturation semblent adaptées pour décrire la fracturation de la roche, elles ne sont pas utilisées dans la pratique. En effet, les intensités volumétriques ne peuvent être déterminées directement sur le terrain et la mesure des intensités surfaciques est longue et fastidieuse. Ces dernières sont par contre aisément quantifiables à l'aide de l'analyse d'images de parois rocheuses.

Grenon (2000) analyse les relations entre différents taux de fracturation pour 43 sites provenant de 5 mines souterraines en roche dure. Pour chaque site, un réseau de discontinuités dont les caractéristiques sont statistiquement semblables aux données récoltées le long de traverses, est généré dans les trois dimensions. P_{21} et P_{22} sont alors évalués selon dix plans d'échantillonnage orientés selon deux directions orthogonales. Cette étude a révélé qu'il existe de très bonnes corrélations entre P_{22}, P_{32} et la fréquence mesurée le long de traverses aléatoires dans un massif rocheux simulé (λ_w). La somme des traces par unité de surface est donc un paramètre tout à fait approprié à la caractérisation des réseaux de discontinuités lorsque des parois d'orientation différente sont disponibles.

De plus, cette intensité offre deux avantages très intéressants pour notre application. Tout d'abord contrairement au nombre de traces par unité de surface, la somme des traces n'est pas influencée par la taille de la fenêtre (Dershowitz et Herda, 1992). Il s'agit d'une caractéristique très importante en milieu souterrain où les dimensions des parois accessibles sont particulièrement

limitées. Enfin, ce paramètre peut être utilisé pour estimer l'espacement moyen entre les traces d'une famille le long d'une traverse normale à ces traces. En effet, la surface moyenne délimitée par deux traces successives $\bar{s}$ est donnée par le produit de l'espacement moyen $\overline{X}$ et de la longueur-trace moyenne $\overline{L}$:

$$\bar{s} = \overline{XL} \qquad \text{(Éq. 3)}$$

Considérant, que n traces sont observées à l'intérieur de la fenêtre de surface S, on déduit l'expression suivante :

$$n\bar{s} = S = n\overline{XL} \qquad \text{(Éq. 4)}$$

Par conséquent,

$$\overline{X} = \frac{S}{n\overline{L}} = \frac{S}{\sum_{\text{Fenêtre}} L_i} = \frac{1}{P_{22}} \qquad \text{(Éq. 5)}$$

La somme des traces d'une famille par unité de surface correspond donc à l'inverse de l'espacement moyen normal des traces d'une famille.

Quantification des propriétés des familles de discontinuités

Les caractéristiques géométriques d'une famille de discontinuités peuvent être décrites à l'aide des informations suivantes:

- Les indices de fracturation;
- La distribution de l'orientation des discontinuités;
- La distribution de la taille des discontinuités; et
- La distribution de l'espacement des discontinuités.

Indices de fracturation

Les indices de fracturation utilisés pour quantifier la fracturation totale des masses rocheuses peuvent également être utilisés pour décrire les familles de discontinuités. Dans le système développé, l'espacement moyen, la fréquence, le nombre et la longueur des traces par unité de surface sont estimés pour chaque famille et pour les discontinuités dites aléatoires (discontinuités n'appartenant à aucune des familles identifiées).

Orientation des discontinuités

La connaissance du pendage et de la direction de pendage des familles de discontinuités est très utile pour évaluer la stabilité des excavations par des méthodes d'équilibre limite. Du point de vue de la caractérisation des masses rocheuses, cette information est également utilisée pour déterminer des paramètres tels que les fréquences linéaires des familles de discontinuités et

d'autres paramètres reflétant dans les trois dimensions le taux de fracturation de la masse rocheuse.

Plusieurs méthodes ont été proposées (Thomas et al., 1987; Maerz, 1990; Crosta, 1997) afin de déterminer le pendage et la direction du pendage des discontinuités grâce à la combinaison d'informations bidimensionnelles extraites de parois rocheuses différemment orientées (Figure 11). En pratique, cette approche rencontre plusieurs difficultés. Ainsi, elle n'est pas adaptée aux cas où les traces de deux familles différentes ont des pendages identiques le long d'une des parois (Figure 11c). De plus, cette méthode suppose l'existence de deux parois rocheuses accessibles, de directions différentes et interceptées par un nombre important de discontinuités appartenant aux mêmes familles de discontinuités. En pratique, cette situation n'est pas souvent disponible dans les exploitations minières. La possibilité d'intégrer cette approche au système de caractérisation n'a pas été considérée dans le cadre de ce projet.

a) b) c)

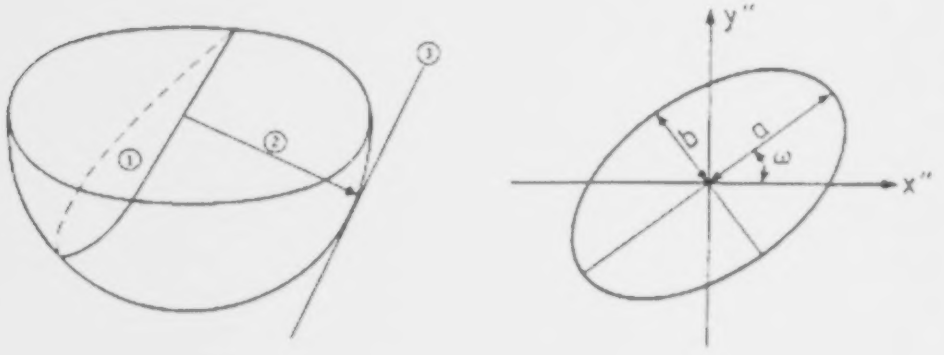
Figure 11. a) Parois d'orientations différentes; b) paires de traces appartenant à des plans de même orientation; et c) trace pouvant être engendrée par deux familles différentes (Crosta, 1997).

Plus récemment, Kemeny et Post (2003) ont proposé un algorithme d'optimisation afin de déterminer la distribution de l'orientation des familles de discontinuités correspondant aux distributions de l'inclinaison des traces observées sur deux parois d'orientations différentes. Des cas d'études synthétiques ont permis d'évaluer la fiabilité de la méthode ainsi que son applicabilité lorsqu'une seule paroi est disponible et que les orientations sont approximées préalablement.

Lorsqu'on souhaite connaître l'orientation des familles de discontinuités tout en limitant le temps nécessaire à l'acquisition des données, la méthode proposée par Mathis (1988) peut également être utilisée. Elle consiste à mesurer le pendage et la direction du pendage d'un nombre limité de discontinuités représentatives de chacune des familles identifiées sur le terrain. Lorsque la paroi est accessible, cette méthode peut facilement être employée en complément de la prise de photographies. C'est pourquoi, une version modifiée de cette approche a été intégrée au système de caractérisation. Dans cette version, pour chaque famille les orientations de 4 discontinuités déviant le plus possible de l'orientation moyenne sont mesurées. Idéalement, les orientations de ces discontinuités 'extrêmes' doivent être les plus éloignées possible l'une de l'autre. Une manière de procéder sur le terrain est d'identifier deux discontinuités dont le pendage apparent le long de la paroi s'écarte le plus fortement possible du pendage moyen des traces de part et d'autre de cette trace moyenne. Deux autres discontinuités dont le pendage apparent dans la direction perpendiculaire à la paroi sont les plus différentes possible, sont ensuite identifiées. Les orientations de ces discontinuités sont ensuite utilisées pour estimer la moyenne et la distribution des orientations de la famille.

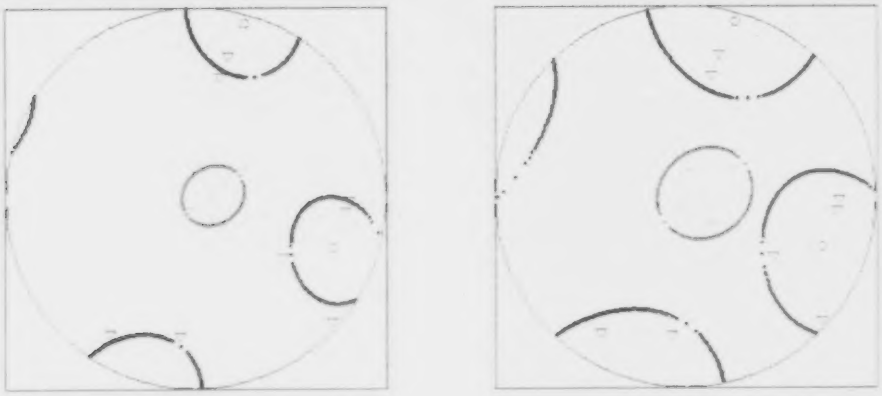
La méthode proposée par Mathis (1988) est basée sur l'hypothèse que l'orientation suit une distribution binormale dont le pic correspond à la valeur moyenne mesurée sur le terrain. Une discontinuité peut être représentée par un pôle. Un pôle est défini comme l'intersection de la normale à la discontinuité avec une sphère centrée au point d'intersection de cette normale avec la discontinuité. Les pôles correspondant aux valeurs extrêmes mesurées sur le terrain sont d'abord transférés de la surface de la sphère vers un plan tangent au pôle correspondant à l'orientation moyenne, Figure 12.

Ensuite, l'ellipse centrée au pôle moyen de la famille et reliant au mieux les pôles correspondant aux valeurs extrêmes est déterminée dans le plan tangent. Des exemples de la projection stéréographique de telles ellipses sont présentés à la Figure 14. Sur cette figure, les pôles correspondant aux orientations extrêmes sont représentés par des triangles et les pôles correspondant aux orientations moyennes sont représentés par des cercles.



a) b)

Figure 13. Illustration de la méthode de Mathis pour la construction d'ellipses représentant la distribution de l'orientation des familles de discontinuités : a) Plan moyen (1), pôle moyen (2) et plan tangent à la sphère; b) ellipse construite dans le plan tangent et représentant la distribution bi-normale de l'orientation des discontinuités (Mathis, 1988).



a) b)

Figure 14. a) Projection stéréographique d'ellipses dont le centre est le pôle moyen des familles et passant au mieux par les pôles des orientations extrêmes mesurées sur le terrain; et b) Projection stéréographique d'ellipses dont le centre est le pôle moyen des familles et délimitant 90% des pôles de la famille.

Mathis (1988) propose de déterminer le niveau de confiance associé à ces ellipses à l'aide de l'expression suivante:

$$p = 1-((n-1)/N) \qquad \text{(Éq. 6)}$$

où n = nombre d'orientations extrêmes;
N = nombre de discontinuités dans la famille; et
p = intervalle de confiance associé à l'ellipse.

Cette relation signifie que plus le nombre de discontinuités d'une famille observées le long de la paroi est important, plus il est probable que le pôle d'une discontinuité de cette famille se trouve à l'intérieur de l'ellipse. Cependant, en pratique, des essais menés pour 13 familles de discontinuités ont montré que l'intervalle de confiance ne dépend pas nécessairement du nombre de discontinuités visibles. Ces essais ont révélé qu'un intervalle de confiance de 65% donne les meilleurs résultats dans la majorité des cas. Cela signifie qu'en moyenne 65% des pôles d'une famille sont situés à l'interieur de l'ellipse obtenue. La détermination de l'intervalle de confiance pourrait être certainement améliorée en utilisant la distribution du pendage apparent des traces de discontinuités. Une fois l'intervalle de confiance estimé, les écarts-types minimum et maximum de la distribution peuvent être déterminés à l'aide des équations suivantes:

$$\sigma_{max} = a / [\ln(1/(1-p)^2)]^{0.5} \qquad \text{(Éq. 7)}$$

$$\sigma_{min} = b / [\ln(1/(1-p)^2)]^{0.5} \qquad \text{(Éq. 8)}$$

où σ_{max} = écart-type maximum de la distribution binormale;
σ_{min} = écart-type minimum de la distribution binormale;
a = grand axe de l'ellipse;
b = petit axe de l'ellipse; et
p = intervalle de confiance associé à l'ellipse.

À partir de ces relations, on peut également calculer le grand et le petit axes de l'ellipse correspondant au niveau de confiance désiré. Des exemples d'ellipses dont le niveau de confiance est de 90% est présenté à la Figure 14b.

Taille des discontinuités

L'aire de la surface d'une discontinuité est probablement le paramètre le plus adéquat afin de quantifier sa taille. Puisqu'il est impossible de mesurer directement ce paramètre, on se limite généralement à traiter le problème de manière bidimensionnelle, c'est-à-dire en considérant les traces linéaires nées de l'intersection entre les discontinuités et la paroi rocheuse. Dans ce cas, les mesures de terrain permettent de déterminer le type de distribution, la moyenne et l'écart-type de la longueur des traces. Il est cependant nécessaire de tenir compte des biais suivants lors du traitement des données récoltées sur le terrain :

- Le biais de censure provoqué par le caractère fini du domaine d'échantillonnage. La surface de la paroi rocheuse accessible étant limitée, il est nécessaire de tenir compte du fait que, dans certains cas, une ou deux extrémités se situent à l'extérieur du domaine échantillonné (Figure 15);

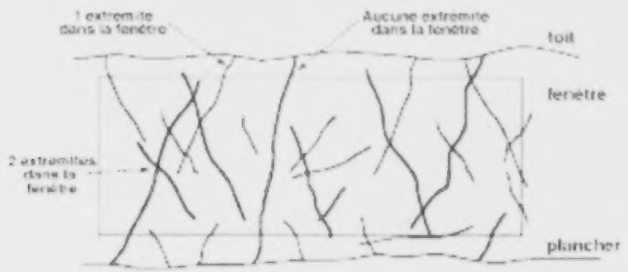


Figure 15. Catégories de discontinuités interceptant une paroi.

- Le biais de troncation existant lorsque seules les traces dont la longueur est supérieure à un certain seuil sont mesurées; et
- Le biais lié à la longueur des traces. Plus la trace est grande et plus la probabilité de l'intercepter à l'aide d'une fenêtre ou d'une traverse est importante. Inversement, il est moins probable d'échantillonner une trace de petite taille et par conséquent, leur fréquence risque d'être sous-estimée. Notons cependant que ce biais est plus important lorsque le relevé est effectué à l'aide d'une traverse que lors du relevé par fenêtres.

Ces vingt dernières années, plusieurs études ont abordé le problème de la mesure des longueurs traces lorsque le relevé est effectué à l'aide de traverses ou de fenêtres. Ces travaux ont pour objectif l'estimation de la longueur trace moyenne, de la distribution des longueurs traces ou de la taille des discontinuités. Dans le cadre de ce projet, l'intérêt est porté plus particulièrement sur les études menées par Pahl (1981), Kulatilake et Wu (1984), Mauldon (1998), et Zhang et Einstein (1998), dont le but est de fournir une estimation de la longueur-trace moyenne pour des domaines d'échantillonnage à deux dimensions. Les méthodes suggérées prennent en compte les biais inhérents à la taille des discontinuités et aux dimensions des fenêtres.

Tout d'abord, Pahl (1981) a proposé une relation pour calculer la longueur trace moyenne (μ_L) en considérant le nombre d'extrémités visibles des traces au sein de la fenêtre tel qu'illustré à la Figure 15. Son approche a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance à priori de la distribution des longueurs traces. Par contre, elle ne fonctionne que lorsque les traces sont parallèles. Kulatilake et Wu (1984) ont donc modifié cette méthode afin de tenir compte de la variabilité du pendage apparent de la trace des discontinuités d'une même famille. Toutefois, la distribution de l'orientation des traces doit être connue pour estimer la longueur trace moyenne. C'est pourquoi Mauldon (1998) ainsi que Zhang et Einstein (1998) ont développé une méthode d'estimation applicable à des traces dont la distribution de l'orientation est arbitraire. L'expression résultant de ces travaux tire profit du caractère symétrique d'une fenêtre d'échantillonnage circulaire. Elle s'exprime comme suit :

$$\mu_L = \frac{\pi(N + N_0 - N_2)}{2(N - N_0 + N_2)} c \qquad \text{(Éq. 9)}$$

où N = nombre de traces présentes dans la fenêtre = $N_0 + N_1 + N_2$;
N_2 = nombre de traces dont les deux extrémités apparaissent dans la fenêtre;
N_1 = nombre de traces dont une extrémité apparaît dans la fenêtre;
N_0 = nombre de traces dont aucune extrémité n'apparaît dans la fenêtre; et
c = rayon de la fenêtre.

Deux cas particuliers doivent cependant être considérés :

- Lorsque N_0=N, $\mu_L \rightarrow \infty$. Dans ce cas, toutes les discontinuités interceptant la fenêtre ont leurs deux extrémités en dehors du domaine d'échantillonnage. Il faut donc augmenter la taille du cercle; et
- Lorsque N_2=N, $\mu_L \rightarrow 0$. Dans ce cas, toutes les discontinuités interceptant la fenêtre ont leurs deux extrémités à l'intérieur du domaine d'échantillonnage. D'après Pahl (1981), ceci indique que les centres des traces ne sont pas répartis uniformément.

Plusieurs constatations faites par Zhang et Einstein (1998) ont des répercussions intéressantes pour notre application. D'abord, une meilleure estimation peut être obtenue en combinant les informations acquises à partir de plusieurs fenêtres de même diamètre plutôt qu'en utilisant une seule fenêtre de plus grand diamètre. Ensuite, la longueur trace moyenne estimée ne semble pas être soumise à l'effet d'échelle. En d'autres termes, il est préférable d'évaluer la longueur trace moyenne à partir de plusieurs fenêtres de taille limitée. D'un point de vue pratique, cela signifie que cette méthode est adaptée aux contraintes d'accès des excavations souterraines où la hauteur

des parois rocheuses est limitée. Plusieurs hypothèses s'appliquent néanmoins lorsqu'on souhaite utiliser cette approche:

- Toutes les discontinuités sont planes et interceptent le plan d'échantillonnage selon un segment de droite;
- Les points centraux des traces sont uniformément distribués dans la fenêtre; et
- La longueur trace et l'orientation des discontinuités sont statistiquement indépendantes l'une de l'autre.

Les simplifications imposées par les deux premières hypothèses sont à priori tout à fait acceptables. En outre, il est raisonnable de penser que la troisième hypothèse est vérifiée au sein d'une même famille de discontinuités. Il est donc nécessaire d'attribuer une famille à chaque trace de discontinuité sur l'image. Cette opération peut être automatisée connaissant le pendage apparent des traces, la direction de la paroi ainsi que l'orientation des familles mesurée tel que suggéré par Mathis (1988).

Espacement des discontinuités

L'espacement entre deux discontinuités est habituellement déterminé en mesurant la distance entre ces deux discontinuités le long d'une traverse d'orientation donnée. L'espacement entre les discontinuités d'une même famille est généralement exprimé par l'espacement normal mesuré le long d'une traverse perpendiculaire aux discontinuités de la famille. Lorsqu'on dispose de cartes de traces, il est d'abord nécessaire de mesurer les espacements apparents (X_a) entre les traces qui représentent les discontinuités de la famille. Ces valeurs sont ensuite corrigées pour obtenir les espacements normaux (X_n) à l'aide de l'expression suivante:

$$X_n = X_a / \cos\delta \qquad \text{(Éq. 10)}$$

avec

$$\cos\delta = |\cos(\alpha_s-\alpha_n) \times \cos\beta_s \times \cos\beta_n + \sin\beta_s \times \sin\beta_n|$$

où X_n = espacement normal entre deux discontinuités d'une même famille;
X_a = espacement apparent entre deux discontinuités d'une même famille;
δ = l'angle aigu entre la droite normale à la famille et la traverse;
β_s = plongée de la traverse;
β_n = plongée de la normale à la famille de discontinuités;
α_s = direction de la traverse; et
α_n = direction de la normale à la famille de discontinuités.

Dans ce travail, afin de limiter le temps de calcul, nous considérons acceptable une erreur sur l'espacement normal moyen inférieure à 10% dans 95% des cas. Ces exigences nécessitent la mesure de 384 espacements par famille et par image. Des traverses sont donc générées jusqu'au moment où ce nombre est atteint.

Cependant, l'utilisation de traverses à l'intérieur de surfaces de dimensions limitées est soumise à un biais qui augmente avec l'espacement moyen entre les discontinuités. En effet, il est physiquement impossible de mesurer un espacement supérieur à la taille de la fenêtre échantillonnée. Ainsi, lorsque l'espacement moyen est du même ordre de grandeur que la taille des fenêtres, il est possible de ne rencontrer aucune trace de la famille au sein de l'image. Par conséquent, la méthode de mesure de l'espacement à l'aide de traverses tend à sous-estimer l'espacement réel. C'est pourquoi nous recommandons de déterminer l'espacement normal moyen des familles à l'aide de sa relation avec la somme des longueurs traces par unité de surface exprimée par l'équation 11.

$$\overline{X_n} = \frac{cos\delta}{P_{22}} \qquad \text{(Éq. 11)}$$

En effet, cette approche présente l'avantage de fournir des valeurs d'espacements non influencées par la taille de la paroi photographiée. Par contre, elle ne donne aucune information sur le type de distribution que suivent les espacements. Lorsque cette information est requise, on peut supposer que les espacements obéissent à une loi exponentielle négative caractérisée par une valeur moyenne identique à l'écart-type. Il s'agit de la loi correspondant à l'hypothèse que la position des discontinuités est aléatoire. Or, cette hypothèse est souvent vérifiée dans les roches magmatiques rencontrées dans le bouclier canadien (Grenon, 2000).

4 Résultats

Les résultats obtenus lors de ce projet sont les suivants :

1. La mise au point d'un système d'acquisition de photographies de parois rocheuses;
2. L'élaboration d'une procédure d'échantillonnage des données nécessaires à la caractérisation géomécanique d'un site;
3. Le développement et implémentation d'un logiciel de construction de la carte des traces;
4. Le développement et implémentation d'un logiciel de caractérisation géomécanique basé sur l'analyse de cartes de traces; et
5. Des travaux de terrain réalisés dans une exploitation souterraine et à ciel ouvert.

4.1 Système d'acquisition de photographies des parois rocheuses

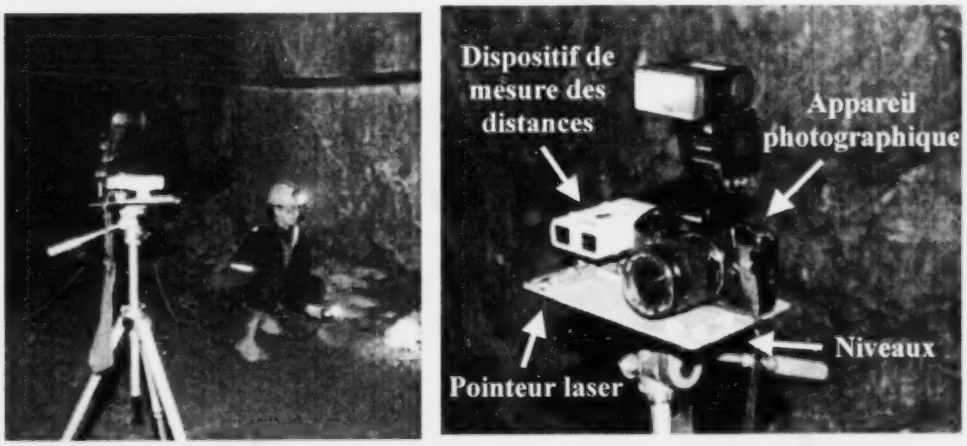
Le système est composé d'un appareil photographique numérique muni d'un flash, d'un outil de mesure des distances, d'un pointeur laser et de niveaux à bulles solidarisés à une plaque métallique fixée sur un trépied (Figure 16). Le dispositif comprend en outre un système d'éclairage léger et peu encombrant alimenté par une batterie de petite dimension qui peut être attachée à la ceinture de l'opérateur. Les spécifications du système d'acquisition photographique sont détaillées au Tableau 1.

Spécifications du système d'acquisition	
Appareil photographique numérique	Canon EOS D30
Objectif	Canon EF 24-85mm

Flash	Speedlite 430EZ (Canon)
Résolution	3.25 millions de pixels (2160x1440)
Source de lumière portable	JC 12V/100W à halogène à quartz
Batterie d'alimentation de la source	12V/84Wh
Dispositif de mesure des distances	Dimensionator Zircon, mesure les distances < 12m avec une précision de l'ordre du cm

Tableau 1. Spécifications du système d'acquisition photographique.

Le dispositif de mesure des distances utilise des ultrasons afin d'évaluer automatiquement la distance entre l'appareil et la paroi. Le pointeur laser a pour fonction de visualiser le centre de la future image ainsi que la zone de la paroi à laquelle on mesure la distance. Enfin, les deux niveaux à bulles placés perpendiculairement l'un à l'autre permettent de maintenir la plate-forme horizontale d'un endroit à l'autre.



a) b)

Figure 16. Système d'acquisition photographique. a) Vue d'ensemble; et b) plate-forme d'acquisition.

4.2 Procédure d'échantillonnage

Prise des photographies

La procédure proposée pour l'acquisition des images est illustrée à la Figure 17. Après nettoyage de la paroi, plusieurs photographies sont prises à l'aide du système d'acquisition. Tout d'abord,

une image est prise avec un flash dirigé normalement à la paroi. Ensuite, une série d'images sont acquises à l'aide de la source de lumière placée obliquement par rapport à la paroi et dirigée vers le centre de la surface échantillonnée. Un tel éclairage a pour effet d'augmenter préférentiellement les contrastes le long des traces perpendiculaires à sa direction. Par conséquent, il est préférable de récolter plusieurs images de la même paroi avec différents éclairages disposés symétriquement, de manière à réduire les biais introduits dans le système de reconnaissance. Ceci est illustré par la Figure 17 où quatre éclairages de directions symétriques sont utilisés pour prendre les photographies. Idéalement, l'intensité de l'éclairage doit être maintenue constante et suffisante.

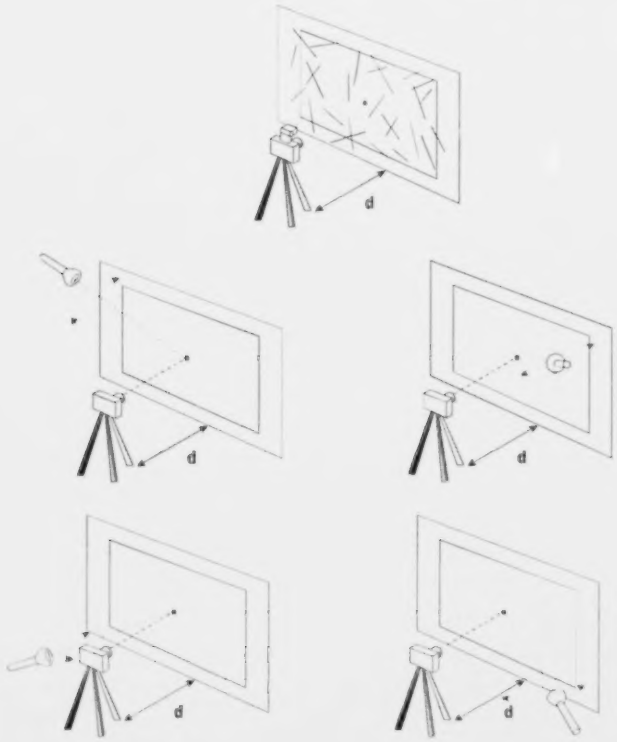


Figure 17. Procédure d'acquisition des images.

Lorsqu'une portion de la paroi est photographiée, le dispositif est déplacé parallèlement à la paroi jusqu'à l'endroit d'où sera prise la prochaine série de photographies. L'espacement entre deux points d'acquisition devrait être du même ordre de grandeur que la largeur de la portion de paroi couverte par les images. De cette manière, on minimisera le nombre d'images prises tout en s'assurant que le maximum d'informations disponibles soit enregistré. Le déplacement d'un point à l'autre se réalise rapidement car il est suffisant, par exemple, d'évaluer la distance à parcourir

avec un certain nombre de pas. Ce détail est important car il permet de minimiser le temps nécessaire pour l'acquisition des données.

Récolte des données géométriques et géomécaniques

Il est également nécessaire d'enregistrer ou de contrôler les informations suivantes lors des travaux de terrain:

Type de roche, localisation du site et familles de discontinuités

La connaissance du type de roche et la localisation des parois photographiées permettent d'établir une base de données facilitant l'évaluation de la variation spatiale des caractéristiques structurales au sein d'une même unité ou entre plusieurs formations géologiques. Dans la méthodologie proposée, il est également nécessaire de réaliser les opérations suivantes qui permettront d'obtenir une caractérisation complète de la géométrie du réseau de discontinuités :

- L'identification des familles de discontinuités; et
- Pour chaque famille, la mesure du pendage et de la direction du pendage de 4 discontinuités représentatives des valeurs extrêmes de l'orientation des discontinuités de la famille.

Position et orientation de la paroi photographiée

La mesure de l'orientation de la paroi photographiée est nécessaire au calcul ultérieur de l'espacement normal des familles de discontinuités. De plus, la position de la paroi par rapport à l'axe de la galerie ou de l'excavation (gauche/droite) doit également être connue, afin de déterminer automatiquement l'appartenance ou non de chacune des traces à une des familles identifiées.

Terzaghi (1965) a montré que les familles de discontinuités parallèles à l'orientation d'une paroi rocheuse ont une plus faible probabilité d'être échantillonnées que les familles normales à cette paroi. Ce problème peut être fortement réduit en photographiant, lorsque disponibles, des parois orthogonales ou d'orientations les plus différentes possibles.

Position de l'appareil par rapport à la paroi et distance focale des lentilles

La résolution de l'image est liée à la dimension de la portion de paroi couverte par l'image. Cette dimension dépend directement de la distance entre l'appareil photographique et la paroi, ainsi que de la distance focale des lentilles de l'objectif. Il est donc nécessaire d'enregistrer cette information sur le terrain. Notons que la taille des excavations minières souterraines conditionne la combinaison adéquate entre la distance à la paroi et la distance focale.

L'appareil photographique, ou plus exactement l'axe optique des lentilles, doit autant que possible être positionné perpendiculairement à la paroi étudiée, dans le but de limiter les distorsions donnant des valeurs erronées des dimensions et de la position des traces de discontinuités sur l'image. L'installation de niveaux sur la plate-forme permet de réduire cette

source d'erreurs. Il n'est toutefois pas possible d'éviter totalement la distorsion qui augmente avec la distance de l'objet photographié avec l'axe optique.

4.3 Développement d'un logiciel de construction automatisée de la carte des traces

Le logiciel *Rockscan* permet d'automatiser la construction de la carte des traces de discontinuités. Ce logiciel est basé sur la méthodologie décrite à la section 3.2.

4.4 Développement d'un logiciel de caractérisation de la carte des traces

Un outil de caractérisation de la fracturation à partir de ces cartes a également été développé. Ce logiciel, *Mapscan*, permet de calculer des paramètres décrivant adéquatement les réseaux de discontinuités tel que la fréquence, l'espacement et la longueur des traces ainsi que divers degrés de fracturation de la roche décrits à la section 3.3.

4.5 Validation du système

Afin de tester et d'ajuster le système d'acquisition, la procédure d'échantillonnage ainsi que les logiciels de construction et d'analyse de la carte des traces, des travaux de terrains ont été menés en milieu industriel. Le premier cas d'étude s'est déroulé dans des excavations souterraines (Mine Bouchard-Hébert) tandis que le second a été mené dans une exploitation à ciel ouvert (Carrière Drapeau).

Mine Bouchard-Hébert

Description

La Mine Bouchard-Hébert de la compagnie Ressources Breakwater est située à Cléricy en Abitibi, dans la région géologique du bouclier canadien. Il s'agit d'une mine en roche dure exploitant une lentille de sulfures massifs riches en zinc. Deux sites ont été rendus accessibles pour les besoins du projet :

- Le site 1 (Niveau 2); et
- Le site 2 (Chantier 3-33).

Les roches rencontrées dans ces sites sont la rhyolite (site 1) et le sulfure massif (site 2). Dans chaque site, la procédure décrite à la section 4.2 a été réalisée. L'emplacement des parois photographiées a été reporté sur les plans des sites fournis par la mine (Figure 18). Respectivement, 18 et 5 fenêtres ont été photographiées dans les sites 1 et 2.

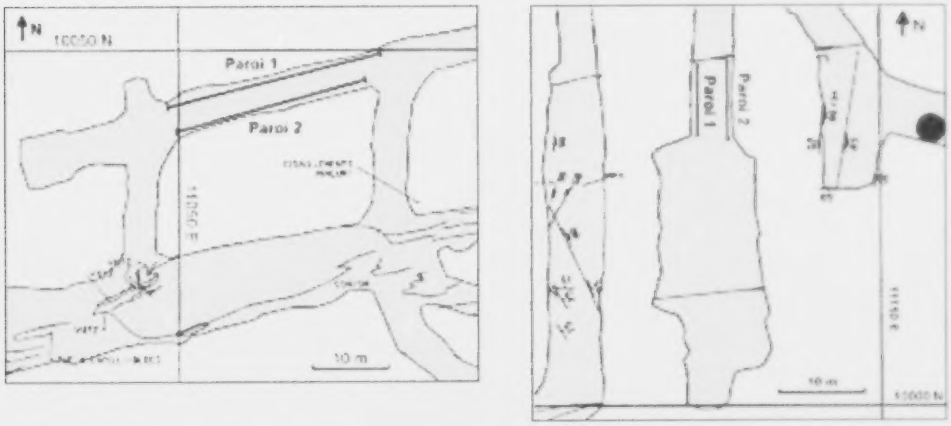


Figure 18. Localisation des parois photographiées au site 1 (Niveau 2) et au site 2 (Chantier 3-33) de la mine Bouchard-Hébert.

Pour chaque site, la carte des traces de discontinuités a été esquissée manuellement pour toutes les parois photographiées afin de valider la méthode de construction des cartes. Les caractéristiques structurales des deux sites ont également été étudiées à l'aide de la méthode traditionnelle de relevés de discontinuités par traverses. Les stéréonets obtenus grâce à ces relevés sont présentés à la Figure 19. Ils représentent la projection des pôles des discontinuités interceptées par les traverses et permettent de déterminer le nombre ainsi que l'orientation moyenne des familles. Ces stéréonets indiquent que trois familles ont été mises en évidence dans chacun des sites. De plus, le site 1 est caractérisé par la présence d'une famille prédominante due à un phénomène de foliation et dont les discontinuités très fréquentes sont quasi parallèles à la paroi.

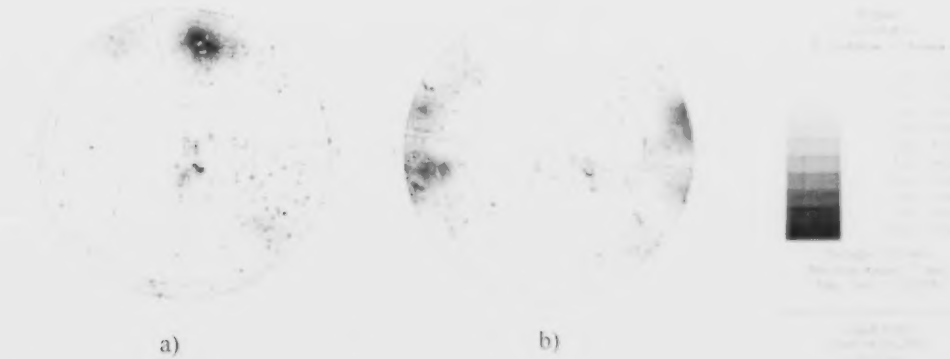


Figure 19. Stéréonets obtenus aux sites 1 (a) et 2 (b) de la mine Bouchard-Hébert.

Construction de la carte des traces

Afin de construire la carte des traces, les images prises sur le terrain ont été traitées à l'aide du logiciel *Rockscan*. Tout d'abord, une résolution de 250 pixels/m a été attribuée à chaque image. Ensuite, les trois cartes de traces suivantes ont été construites pour chaque fenêtre à l'aide du logiciel :

- La carte de traces construite de manière automatique sans intervention de l'utilisateur;
- La carte de traces construite de manière semi-automatique avec l'intervention de l'utilisateur; et
- La carte de traces construite manuellement à l'aide de la souris inspirée des données récoltées sur le terrain.

A titre d'exemple, les trois cartes obtenues pour la fenêtre 11 du site 1 sont présentées à la Figure 20. Les valeurs des paramètres utilisées pour les constructions automatiques et semi-automatiques des cartes sont présentées dans le Tableau 2 . Il est important de souligner que pour les deux sites de la mine Bouchard-Hébert, seule la détection des arêtes a été réalisée. En effet, dans le site 1 localisé dans la rhyolite, seules quelques discontinuités sont reconnaissables grâce à un remplissage de quartz formant des lignes claires dans l'image. De plus, les faces de ces discontinuités semblent bien cimentées par le remplissage et constituent dans une moindre mesure des plans de faiblesse au sein de la masse rocheuse. Elles n'ont donc pas été prises en compte dans cette étude. En ce qui concerne le site 2 (sulfures massifs), aucune discontinuité n'est caractérisée par la présence significative de matériaux de remplissage et la grande majorité des traces forment des arêtes au sein des images prises avec un éclairage oblique.

Paramètres	Valeurs
Résolution	250 pixels/m
Paramètres de détection des arêtes : • Seuil Haut • Seuil Bas • Largeur	 0.2 (valeur par défaut) 0.08 (valeur par défaut) 1
Degré de ressemblance avec une discontinuité	Variable (0.4 à 0.7)
Paramètres de prolongement des segments : • Taille du voisinage • Différence de direction tolérée	 Variable (5 à 10) 30° (valeur par défaut)
Amplitude de la dilatation pour la superposition	Variable (3 à 5)
Taille des segments à éliminer	12.5 pixels ou 5 cm (valeur par défaut)

Tableau 2. Valeurs des paramètres utilisées pour la construction des cartes de traces pour les sites 1 et 2 de la mine Bouchard-Hébert.

Le tri des segments dans l'image est réalisé à l'aide de réseaux de neurones. Deux réseaux de neurones ont été créés pour la classification des segments dans les sites 1 et 2. Il est intéressant de constater qu'un réseau créé à partir d'un des deux sites peut être utilisé pour la classification des segments de l'autre site sans grande perte au niveau des performances du tri. D'une manière générale, près de 95% des segments sont classés correctement à l'aide de ces réseaux.

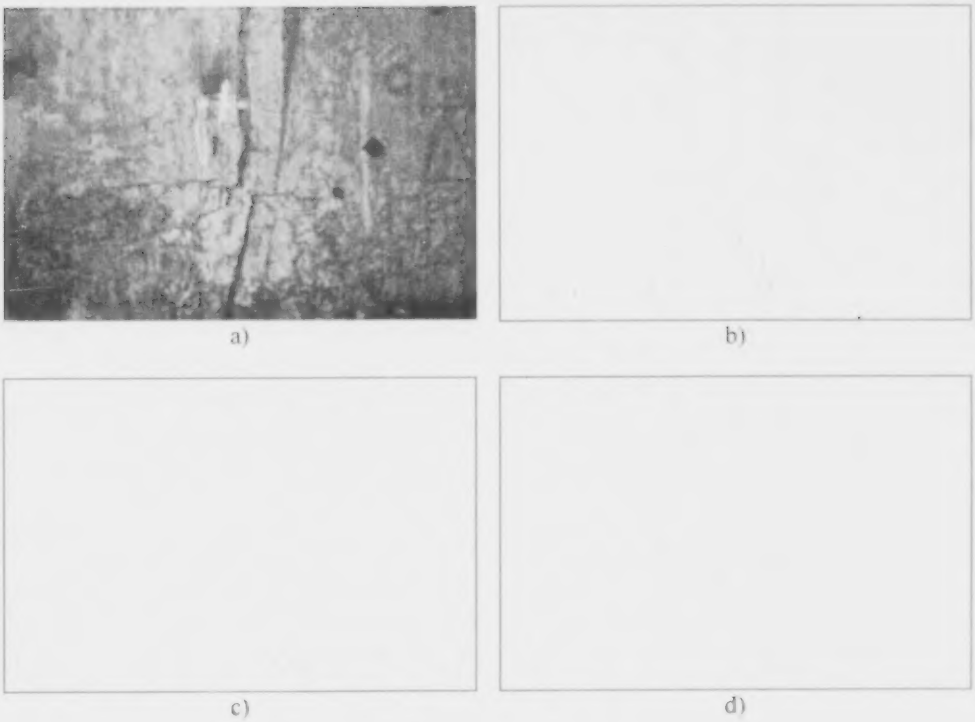


Figure 20. Cartes de traces obtenues pour la fenêtre 11 du site 1. a) Image de la fenêtre prise avec un éclairage normal à la paroi; b) carte des traces construite automatiquement; c) carte des traces construite de manière semi-automatique; et d) carte des traces construite manuellement à l'aide de la souris.

En comparant les cartes de traces présentées à la Figure 20, on observe que les cartes obtenues de façon automatisée contiennent plus de traces que la carte construite manuellement. Cette constatation est valable pour la plupart des fenêtres du site 1. Cette différence peut être expliquée par la géométrie de la foliation qui fournit la majeure partie des discontinuités rencontrées dans ce site. En effet, ces discontinuités très peu espacées (espacement normal de l'ordre du cm) ont des orientations proches de celle de la paroi. Par conséquent, la topographie de la paroi est directement liée à la présence de ces discontinuités. Or, il est souvent difficile de déterminer si une irrégularité de la paroi correspond à un plan de foliation ou non. Notons que l'utilisation d'un éclairage placé perpendiculairement aux traces engendrées par la foliation facilite grandement leur identification.

Caractérisation géomécanique

Les différents paramètres géomécaniques décrits précédemment ont été quantifiés à l'aide du logiciel *Mapscan*. La distribution blocométrique et les indices de fracturation ont été quantifiés pour les trois catégories de cartes de traces. Par contre, les caractéristiques des familles ont été mesurées uniquement à partir des cartes construites de façon semi-automatique et manuellement.

La comparaison des indices de fracturation confirme les observations discutées ci-haut suite à l'examen des différentes cartes de traces. En effet, les indices de fracturation mesurés à partir des cartes construites de manière semi-automatique sont systématiquement plus importants que ceux obtenus à l'aide des cartes manuelles (différences moyennes de 16, 19 et 20% respectivement pour la fréquence, le nombre et la somme des longueurs-traces par unité de surface). La moyenne des sommes des longueurs-traces par unité de surface passe de 4.36 à 5.19 m^{-1} suite à l'intervention de l'utilisateur en raison des traces qui n'ont pu être identifiées par le système. Si l'on excepte le nombre de traces par unité de surface, on constate que l'option semi-automatique ne permet pas de réduire les erreurs sur les paramètres calculés. Ceci est du à un phénomène de compensation qui affecte les valeurs extraites des cartes tracées automatiquement. En effet, la présence de segments qui n'ont pas été identifiés sur les cartes manuelles, compense la non détection de plusieurs traces.

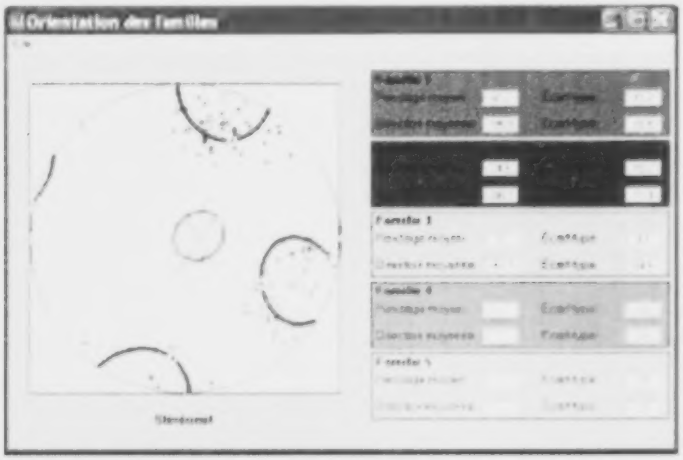


Figure 21. Stéréonet montrant les pôles correspondant aux 4 orientations extrêmes mesurées pour chaque famille du site 1 (V), les ellipses reliant au mieux ces orientations, ainsi que les pôles des discontinuités échantillonnées lors du relevé par traverses (+).

En ce qui concerne la caractérisation des familles de discontinuités, on observe que, quelque soit la méthode utilisée, les longueurs-traces moyennes estimées à partir des cartes tracées de façon semi-automatique et manuellement sont similaires (différences moyennes de 5 et 13% respectivement pour la mesure directe et la méthode utilisant des fenêtres circulaires). Les différences moyennes entre les valeurs de l'espacement normal obtenues à partir de ces deux types de cartes sont quant à elles de 12% lorsque des traverses sont utilisées et de 24% lorsque la somme des longueurs-traces est inversée. Cette dernière méthode est cependant plus adéquate pour ce cas d'étude car la taille des fenêtres est du même ordre de grandeur que l'espacement moyen des familles. Enfin, la méthode proposée afin d'estimer l'orientation des familles a permis

d'obtenir des distributions très proches de celles découlant du relevé de discontinuités par traverses. Ceci est illustré par le stéréonet de la Figure 21 où sont reportées les discontinuités échantillonnées au site 1 de la mine Bouchard-Hébert. Cette figure montre plus précisément les pôles correspondant aux 4 discontinuités extrêmes mesurées pour chaque famille (V), les ellipses reliant au mieux les pôles de ces discontinuités, ainsi que les pôles des discontinuités échantillonnées lors du relevé par traverses (+). Pour rappel, on a considéré pour les cas d'études menés au cours de ce projet, que 65% des pôles d'une famille se trouvent à l'intérieur de l'ellipse reliant au mieux les pôles des discontinuités extrêmes mesurées pour cette famille.

Carrière Drapeau

Description

La Carrière de la Sablière Drapeau est située à Val-Bélair dans la région de Québec. Il s'agit d'une carrière exploitant le granite à des fins de production de granulats. La paroi rocheuse sélectionnée pour les besoins du projet correspond à un banc d'exploitation d'environ 10m de hauteur (Figure 22).

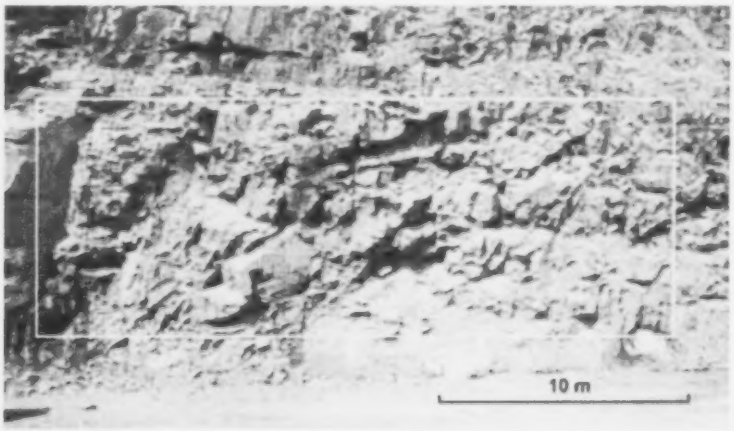


Figure 22. Paroi sélectionnée à la carrière Drapeau.

Dans le cas d'une exploitation à ciel ouvert, l'éclairage est imposé par la direction et l'intensité de la lumière naturelle. Par conséquent, une seule photographie par fenêtre a été prise lors des travaux de terrain. Trois fenêtres de dimensions 11.4 x 9.4 m ont été analysées.

Les caractéristiques structurales du site ont également été étudiées à l'aide de la méthode traditionnelle de relevés de discontinuités par traverses. La traverse a ainsi été positionnée dans la partie inférieure accessible de la paroi illustrée à la Figure 22. Le stéréonet obtenu grâce à ce relevé est présenté à la Figure 23. Il indique que quatre familles ont été identifiées pour ce site.

Figure 23. Stéréonet obtenu à la carrière Drapeau.

Construction de la carte des traces

Afin de construire la carte des traces, les images prises sur le terrain ont été traitées à l'aide du logiciel *Rockscan*. Tout d'abord, une résolution de 100 pixels/m a été attribuée à chaque image. Ensuite, trois cartes de traces différentes ont été construites pour chaque fenêtre à l'aide du même logiciel :

- La carte de traces construite de manière automatique sans intervention de l'utilisateur;
- La carte de traces construite de manière semi-automatique avec l'intervention de l'utilisateur; et
- La carte de traces construite manuellement à l'aide de la souris.

A titre d'exemple, les trois cartes obtenues pour la fenêtre 2 sont présentées à la Figure 24. Les valeurs des paramètres utilisées pour les constructions automatiques et semi-automatiques des cartes sont présentées dans le Tableau 3. Il est important de souligner que, pour des cas d'étude à ciel ouvert, la méthodologie de construction de la carte des traces élaborée pour des conditions souterraines doit être modifiée. En effet, dans ce cas, l'image de la paroi est utilisée à trois reprises. Elle est d'abord traitée pour la détection des arêtes en supposant que l'éclairage naturel provient successivement d'en haut à gauche et d'en haut à droite. L'image est ensuite utilisée une troisième fois pour la détection des lignes.

Le tri des segments dans l'image est réalisé à l'aide de réseaux de neurones. Deux réseaux de neurones ont été créés pour la classification des segments lignes et des segments arêtes. D'une manière générale, près de 95% des segments sont classés correctement à l'aide de ces réseaux.

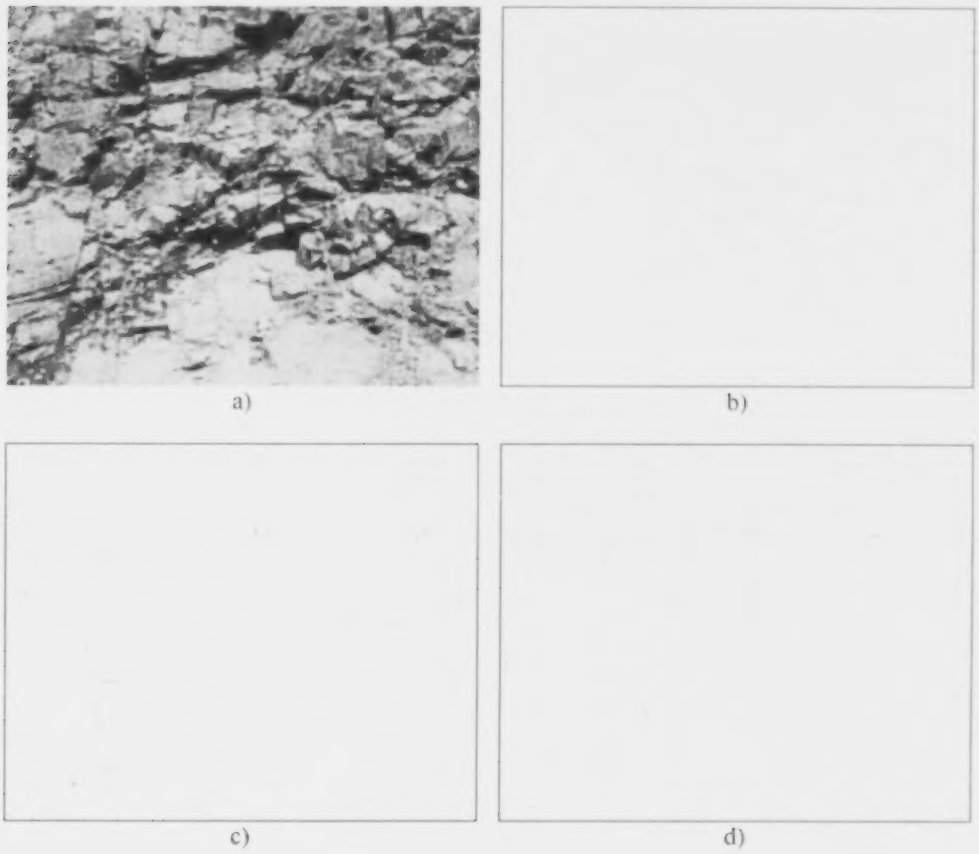


Figure 24. Cartes de traces obtenues pour la fenêtre 2. a) Image de la fenêtre; b) carte des traces construite automatiquement; c) carte des traces construite de manière semi-automatique; et d) carte des traces construite manuellement à l'aide de la souris.

En comparant les cartes de traces présentées à la Figure 24, on observe que les cartes obtenues de façon automatisée contiennent plus de petites traces que la carte construite manuellement à partir de l'image. Cette différence est expliquée principalement par la présence de petits segments engendrés par des contrastes importants. Or, il est parfois très difficile de déterminer à partir de l'image si ces segments correspondent à des traces ou non. Ces 'irrégularités' dans la paroi ne sont toutefois pas accessibles sur le terrain. On peut également remarquer que le système automatisé ne peut reconnaître ou reconnaît partiellement les traces qui ne sont pas clairement mises en évidence par la lumière du jour. L'utilisateur ne possède cependant aucun contrôle sur l'intensité et la direction d'un tel éclairage. Il s'agit d'une limitation associée aux conditions à ciel ouvert.

Paramètres	Valeurs
Résolution	100 pixels/m
Paramètres de détection des arêtes : • Seuil Haut • Seuil Bas • Largeur Paramètres de détection des lignes : • Seuil • Largeur	 0.1 0.04 1.5 2.5 (valeur par défaut) 1
Degré de ressemblance avec une discontinuité : • Lignes • Arêtes	 Variable (0 à 0.1) Variable (-0.2 à -0.1)
Paramètres de prolongement des segments : • Taille du voisinage • Différence de direction tolérée	 4 30° (valeur par défaut)
Amplitude de la dilatation pour la superposition	3
Taille des segments à éliminer	10 pixels ou 10 cm

Tableau 3. Valeurs des paramètres utilisées pour la construction des cartes de traces pour le site de la carrière Drapeau.

Caractérisation géomécanique

Les différents paramètres géomécaniques décrits précédemment ont été quantifiés à l'aide du logiciel *Mapscan*. La distribution blocométrique et les indices de fracturation ont été quantifiés pour les trois catégories de cartes de traces. Les caractéristiques des familles ont quant à elles été mesurées pour les cartes construites de façon semi-automatique et manuellement. La comparaison des indices de fracturation confirme les observations discutées ci haut, effectuées en comparant les différentes cartes de traces. Ainsi, la moyenne des sommes des longueurs-traces par unité de surface passe de 2.97 à 4.53 m^{-1} suite à l'intervention de l'utilisateur, en raison des traces qui n'ont pu être identifiées par le système. La valeur moyenne de ce paramètre pour les cartes construites manuellement est de 3.99 m^{-1} soit 14% de moins que la valeur obtenue pour les cartes construites de manière semi-automatique. Ceci reflète la présence de petites traces au sein des cartes semi-automatiques qui ne sont pas retrouvées dans les cartes tracées manuellement. Ceci est confirmé par les valeurs du nombre de traces par unité de surface qui sont de 16, 9 et 5 m^{-2} respectivement pour les cartes construites automatiquement, de manière semi-automatique et manuellement.

On constate que les espacements normaux des familles obtenus à partir des cartes 'semi-automatiques' et 'manuelles' sont similaires, quelque soit la méthode utilisée pour les évaluer (différences moyennes de l'ordre de 10%). Les valeurs des espacements sont systématiquement supérieures lorsqu'elles sont calculées à partir de la somme des longueurs-traces. En effet, l'approche utilisant des traverses ne peut mesurer des espacements supérieurs à la taille de la fenêtre. Ce phénomène est donc d'autant plus important que la fréquence des traces d'une famille est petite. En ce qui concerne l'évaluation des longueurs-traces, on remarque que les cartes construites de façon semi-automatique fournissent des valeurs 15 à 60% inférieures à celles

évaluées à l'aide des cartes tracées manuellement. Ces différences sont à nouveau expliquées par la présence plus importante de petites traces au sein des cartes semi-automatiques. Enfin, la méthode proposée dans ce projet afin d'estimer l'orientation des familles a de nouveau permis d'obtenir des distributions très proches de celles découlant du relevé de discontinuités par traverses.

5 Discussion

La discussion des résultats est divisée en deux parties. La première partie traite de la construction de la carte des traces et la seconde de la caractérisation de la fracturation. Le logiciel *Rockscan* a été conçu afin d'offrir à l'utilisateur la possibilité de construire la carte des traces manuellement, automatiquement ou en utilisant la combinaison de ces deux options. La comparaison des performances de ces différentes options a débouché sur les constatations suivantes :

- La méthode automatique permet de réduire le travail de construction des cartes. Selon la géologie, la partie accomplie par le système est plus ou moins importante. Lors des cas d'études présentés dans ce projet, la contribution de l'opération semi-automatique a représenté 16% de la somme totale des longueurs-traces à la mine Bouchard-Hébert pour 34% à la Carrière Drapeau. Cette différence est due au fait que la reconnaissance automatique est plus performante pour les sites de la mine souterraine où il est possible de contrôler l'éclairage. Il est également important de s'assurer que le système n'induise pas une quantité importante d'erreurs. En effet, il faut éviter que trop de temps soit consacré à l'élimination des erreurs. De plus, il est plus simple d'identifier une trace manquante qu'un segment ne représentant pas une trace.

- Le tri des segments détectés par le système est une étape essentielle de la partie automatique de la construction des cartes. Il était donc important de vérifier l'applicabilité des réseaux de neurones créés pour réaliser ce tri. Les sites étudiés à la mine Bouchard-Hébert sont situés dans deux types de roches, les sulfures massifs et la rhyolite. Cette étude a révélé qu'un seul réseau pouvait être utilisé pour le tri des arêtes dans ces deux types de roches couramment rencontrés dans le bouclier canadien où se trouvent la plupart des mines du Québec.

- La construction semi-automatique des cartes de traces dépend de l'expérience de l'utilisateur et de sa connaissance du terrain. Il est donc préférable que la personne réalisant l'analyse soit celle qui ait récolté les données sur le terrain. L'utilisation d'un éclairage indirect aide grandement la reconnaissance des traces.

Le logiciel *Mapscan* permet de mesurer des caractéristiques géométriques des réseaux de discontinuités qui ne peuvent être estimées à l'aide des méthodes usuelles d'échantillonnage. L'analyse des valeurs de ces caractéristiques pour les différents cas d'études a débouché sur les constatations suivantes :

- Un des principaux problèmes associés à l'utilisation d'images pour caractériser les masses rocheuses est la taille limitée des parois couvertes par chaque photographie. En effet, cette limitation induit un biais sur les valeurs mesurées, qui peut être très important. Des méthodes de caractérisation indépendantes de la taille de la fenêtre d'échantillonnage ont été proposées

dans le cadre de ce projet. Les différents cas d'études ont souligné l'importance de tenir compte de ce biais.

- Dans ce projet, l'orientation des familles est déterminée à l'aide d'une méthode qui permet de minimiser le temps nécessaire pour prendre les mesures sur le terrain tout en fournissant des données de qualité acceptable. Cette méthode nécessite cependant un personnel expérimenté ainsi que l'accès à la paroi. De plus, il est nécessaire de tester davantage cette méthode afin de déterminer ses performances réelles. Enfin, il est important de mentionner que le niveau d'erreur tolérable dépend directement de l'objectif de la caractérisation, qui détermine la précision requise. Ce niveau d'erreur varie également en fonction du paramètre mesuré.

- La mesure de plusieurs caractéristiques importantes des discontinuités (telles que l'ouverture, le remplissage, la rugosité, l'ondulation et les venues d'eau) n'a pas été étudiée dans le cadre de ce projet. Cependant, l'expérience acquise dans le cadre de ce travail permet de penser que les résolutions d'image utilisées (100 à 250 pixels/m) devraient être suffisantes pour rendre possible la mesure de l'ondulation des discontinuités ainsi que l'identification de matériaux de remplissages et de venues d'eau. La mesure de la rugosité et de l'ouverture des discontinuités requiert quant à elle des images de plus haute résolution (> 500 pixels/m). Cependant, il n'est pas suffisant de disposer d'images à haute résolution pour pouvoir quantifier l'ouverture, la rugosité et l'ondulation des discontinuités. En effet, la mesure de ces paramètres est souvent difficile, voire impossible, à réaliser lorsque la paroi est irrégulière et/ou lorsque les traces de discontinuités sont représentées par des arêtes dans l'image. Cette situation est malheureusement très fréquente sur le terrain. Il nécessaire dans ce cas de recourir aux méthodes traditionnelles de caractérisation.

6 Conclusions

6.1 Objectifs du projet

L'objectif de ce projet était de développer un système permettant de :

- Effectuer rapidement des relevés de discontinuités dans des zones inaccessibles ou accessibles durant un temps limité (par exemple, avant la pose d'un système de support tel que le béton projeté);
- Fournir une méthode d'acquisition de l'information plus objective et reproductible tout en augmentant la quantité et la qualité de données récoltées;
- Faciliter la création de bases de données accessibles en tout temps; et
- Limiter l'exposition des personnes chargées de la caractérisation des massifs rocheux à des terrains de mauvaise qualité et donc potentiellement instables.

6.2 Travaux réalisés

Les travaux réalisés lors de ce projet sont les suivants :

1. Une revue bibliographique;

2. La mise au point de la méthodologie utilisée pour rencontrer les objectifs;
3. Le développement d'un système d'acquisition de photographies de parois rocheuses;
4. L'élaboration d'une procédure d'échantillonnage des données nécessaires à la caractérisation géomécanique d'un site;
5. L'implémentation d'un logiciel de construction de la carte des traces;
6. L'implémentation d'un logiciel de caractérisation de la carte des traces; et
7. Des travaux de terrain dans une exploitation souterraine et à ciel ouvert.

6.3 Contribution des travaux réalisés

Réduction du temps nécessaire pour les travaux terrain

Le système d'acquisition et la procédure d'échantillonnage mis au point comportent plusieurs avantages et minimisent le temps requis pour les travaux de terrain ainsi que l'exposition de l'opérateur à la paroi rocheuse. En effet, lors des travaux de terrain menés au site 1 de la mine Bouchard-Hébert, les temps pris par deux personnes pour récolter l'information disponible le long de parois d'environ 125 m^2 (50 x 2.5 m) sont les suivants :

- 1 heure pour photographier les parois et récolter les données nécessaires;
- 4 heures pour dessiner les cartes de traces à l'aide de photographies de la paroi utilisées en arrière-plan; et
- 5 heures pour effectuer le relevé de discontinuités par traverses.

Il est utile de mentionner que le massif rocheux à cet endroit de l'exploitation est très peu fracturé. Par conséquent, le dessin des cartes et le relevé par traverses sont dans ce cas relativement rapides. Par contre, le temps requis pour la prise de photographies est indépendant du taux de fracturation de la roche. Il est également important de noter que l'ensemble de l'équipement nécessaire est relativement peu coûteux.

Augmentation de la quantité des données échantillonnées

A titre d'exemple, 153 discontinuités ont été interceptées lors du relevé par traverses mené dans le site 1 de la mine Bouchard-Hébert. Environ dix fois plus de discontinuités ont été identifiées à l'aide des images.

Augmentation de la qualité des données échantillonnées

L'analyse d'images offre l'opportunité de mesurer des paramètres décrivant mieux les caractéristiques des réseaux de discontinuités, lesquelles ne peuvent être quantifiées à l'aide des méthodes traditionnelles de relevés de discontinuités. De plus, l'augmentation du nombre de données combinée à un échantillonnage surfacique permet de réduire fortement les biais associés à un échantillonnage linéaire. Un très bon exemple de ce phénomène est la mesure de la longueur-trace moyenne pour la famille 1 au site de la carrière Drapeau. Cette valeur est de 3.24 m lorsque mesurée à l'aide d'une traverse et de 0.97 m lorsque mesurée à l'aide de cartes de traces. Cette différence est attribuée au fait que la probabilité d'intercepter des petites traces à l'aide d'une traverse est beaucoup faible que lorsque des fenêtres sont utilisées.

6.4 Travaux futurs

Plusieurs améliorations possibles du système ont été identifiées au cours du projet. Il est toutefois recommandé que les futurs travaux se concentrent prioritairement sur les points suivants :

- Le système devrait être davantage testé à l'aide d'autres cas d'études représentant différentes conditions géologiques et d'éclairage;
- La méthode de détermination de l'orientation devrait être améliorée en utilisant la distribution du pendage apparent des traces;
- L'interface de préparation des images devrait comprendre une option permettant de corriger les distorsions au sein des images (ortho-rectification des images). Ceci est particulièrement important lorsque des parois non verticales sont analysées c'est-à-dire dans le cadre d'applications dans des exploitations à ciel ouvert; et
- De futures recherches devraient être menées afin de valoriser les résultats de la caractérisation géomécanique fournis par le système. Les données acquises peuvent par exemple être intégrées à un système de classification basé sur l'analyse d'images ou encore être utilisées comme données d'entrée à des modèles numériques. Des travaux préliminaires ont d'ailleurs été menés dans ce sens (Grenon et al., 2004).

6.5 Applicabilité des résultats

Cette méthodologie a été développée pour des environnements souterrains. Par contre, celle-ci est également applicable à des environnements en surface, mines à ciel ouvert, carrières, coupe de routes, etc. Tant le domaine du génie minier que du génie civil pourra profiter de cette méthodologie.

6.6 Retombées éventuelles

Les éventuelles retombées de ce projet sont les suivantes :

- Le système facilitera la mise en oeuvre de campagnes de caractérisation des masses rocheuses dans les exploitations minières. En effet, lorsqu'ils sont menés, les travaux de caractérisation sont généralement négligés en raison de contraintes de temps et d'accès. L'outil développé facilite également la création de bases de données accessibles en tout temps;
- La plus grande quantité et qualité des données disponibles devrait permettre d'améliorer la conception des excavations;
- Ce nouvel outil d'acquisition des données permet d'envisager la création de meilleures méthodes de conception des excavations;
- Cette technique pourrait également s'avérer utile pour effectuer le suivi des dégradations des parois rocheuses observées lorsque les contraintes sont élevées; et
- Enfin, le système limite l'exposition des personnes chargées de la caractérisation à des terrains de mauvaise qualité et donc potentiellement instables.

Références

Association Paritaire du Secteur Minier (A.P.S.M.), (2000). Statistiques.

ALLAM M.M., (1978). The estimation of fractures and slope stability of rock faces using analytical photogrammetry. Photogrammetria, 34, pp. 89-99.

BARATIN L., CROSILLA F. & PARONUZZI P., (1990). Image processing for determining joint parameters in difficult rock slope conditions. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, SPIE, 1935, pp. 878-885.

BEDAIR A., 1996. Digital Image Analysis of Rock Fragmentation from Blasting. Thèse de doctorat, Université McGill, Montréal, Canada.

BLACKWELL G. & KLINGMANN S., (1999). The application of digital video plotter (DVP) systems to open pit wall slope analysis. CIM Annual General Meeting, Calgary.

CHEUNG L.C.C., PONIEWIERSKI J.M., WARD B., LEBLANC D., THURLEY M.J. & MACONOCHIE A.P., (1996). SIROJOINT and SIROFRAG : New techniques for joint mapping and rock fragment size distribution measurement. Rock Fragmentation by Blasting, Mohanty (éd.), Balkema, Rotterdam, pp. 253-258.

COTE P., (2000). Application de l'analyse d'images à la caractérisation géomécanique du massif rocheux. Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.

CROSTA G., (1997). Evaluating rock mass geometry from photographic images. Rock Mech. Rock Engng., 30 (1), pp. 35-58.

DEERE D.U. & DEERE D.W., (1988). The Rock Quality Designation (RQD) index in practice. Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie (éd.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.

DERSHOWITZ W.S. & HERDA H.H., (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. Rock Mechanics, Tilleron & Wawersik (éds.), Balkema, Rotterdam, pp. 757-766.

DONY R.D., (1988). Line detection on rock face images. M.A.Sc. Thesis, Univ. of Waterloo, Waterloo, Canada.

FENG Q., SJÖGREN P., STEPHANSSON O. & JING L., (1999). Fracture mapping of exposed rock faces by Total Station method. Proceedings of the 9th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Paris, Vouille et Berest (éds.), Balkema, Rotterdam.

FENG Q., FARDIN N., JING L. & STEPHANSSON O., (2003). A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces. Rock Mech. Rock Engng. 36 (1), pp. 3-25.

GAICH A., SCHUBERT W. & PÖTSCH M., (2004). Reproductible rock mass description in 3D using the JointMetriX3D system. Proceedings of EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Salzbourg, Austria, Schubert (ed.), pp. 61-64.

GONZALEZ R.C. & WOODS R.E., (2002). Digital image processing. Addison-Wesley (éd.), 2ième edition, 793 pages.

GRENON M., HADJIGEORGIOU J. & LIU K., (1997). Caractérisation de la fracturation in-situ de la fragmentation à l'explosif du massif rocheux à Heath Steele Mines, Nouveaux-Brunswick. 20ième session d'étude sur les techniques de sautage, SEEQ, Université Laval, Québec.

GRENON M., (2000). Conception des excavations minières souterraines à l'aide de la modélisation de réseaux de discontinuités. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada.

GRENON M., LEMY F. & HADJIGEORGIOU J., (2004). Fracture modelling based on input data from line mapping and image analysis. Proceedings of EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Salzbourg, Austria, Schubert (ed.), pp. 445-448.

GROBLER H.P., POROPAT G. & GUEST A.R., (2003). Photogrammetry for structural mapping in mining. Proceedings of the 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Sandton (Johannesburg), M. Handley & D. Stacey (éds.), The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 431-436.

HADJIGEORGIOU J., LESSARD J.F., VILLAESCUSA E. & GERMAIN P., (1995). An appraisal of structural mapping techniques. Second Int. Conf. On Jointed and Faulted Rock, Vienne, Rossmanith (éd.), Balkema, Rotterdam, Maison d'édition, pp. 191-197.

HADJIGEORGIOU J., LESSARD J.F. & GRENON M., (2000). Soutènement des excavations minières souterraines. Rapport soumis à l'institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, rapport R-268, 2001, 47 pages.

HADJIGEORGIOU J., LEMY F., CÔTÉ, P. & MALDAGUE X., (2003). An evaluation of image analysis algorithms for constructing discontinuity trace maps. Rock Mech. Rock Engng., 36 (2), pp. 163-179.

HAGAN T.O., (1980). A case of terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 15, pp. 191-198.

KEMENY J., DEVGAN A., HAGAMAN R. & WU X., (1993). Analysis of rock fragmentation using digital image processing. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 7, pp. 1144-1160.

KEMENY J. & POST R., (2003). Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. Computers & Geosciences, 29, pp. 65-77.

KEMENY J., MOFYA E. & HANDY J., (2003). The use of digital imaging and laser scanning technologies for field rock fracture characterization. Proceedings of Soil Rock America 2003 - 39th US Rock Mechanics Symposium, Boston, USA, J. Culligan, H. Einstein & A. White (éds.), MIT, Cambridge, pp. 117-122.

KLEINE T.H., (1988). A Mathematical model of rock breakage by blasting. Ph.D. Thesis, University of Brisbane, Australia.

KULATILAKE P.H.S.W. & WU T.H., (1984). Estimation of mean trace length of discontinuities. Rock Mech. Rock Engng., 17, pp. 215-232.

LEMY F., HADJIGEORGIOU J., CÔTÉ P. & MALDAGUE X., (2001). Image analysis of drill core. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A : Min. Industry), 110, September-December, pp. A172-A177.

LEMY F. & HADJIGEORGIOU J., (2003). Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences. 40 pp. 903-917.

MAERZ N.H., (1990). Photoanalysis of Rock Fabric. Thèse de doctorat, Université of Waterloo, Waterloo, Canada.

MAULDON M., (1998). Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. Rock Mechanics and Rock Engineering, 31 (4), pp. 201-216.

MATHIS J.I., (1988). Development and verification of a three dimensional rock joint model. Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

MCCARTER M.K., (1976). Application of plane photogrammetry to open pit mapping. U.S. Symposium on Rock mechanics, Snowbird, Society of Mining Engineers of AIME, Chapter 13, pp. 93-98.

MILNE D., HADJIGEORGIOU J. & PAKALNIS R., (1998). Rock mass characterization for underground hard rock mines. Canadian Tunnelling, pp. 107-117.

PAHL P.J., (1981). Estimating the mean length of discontinuity traces. Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr., 18, pp. 221-228.

PRIEST S.D., (1993). Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall (éds.), Londres, 472 pages.

REID T.R. & HARRISON J.P., (2000). A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37, 1073-1089.

SLOB S., HACK R. & TURNER A.K., (2002). An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. Proceedings of the ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions, Eurock 2002, Funchal, Portugal, C. Dinid da Gama and L. Riberia e Sousa (éds.), Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, pp. 87-94.

ST-CYR C., CORTHÉSY R. & LEITE M.H., (2000). Détection des mouvements aux parois d'excavations en rocher par imagerie numérique – Résultats préliminaires. Comptes-rendus de la 16ième conférence annuelle de l'Association canadienne des tunnels (ACT), Montréal, Corthésy et Leite (éds.), pp. 63-72.

TERZAGHI R.D., (1965). Sources of error in joint surveys. Géotechnique, 15, pp. 287-304.

THOMAS A., PINEAU A. & BLIN-LACROIX J., (1987). Determination of a fracture network. Int. J. Num. Analytical Methods in Geomech., 11, pp. 381-390.

TSOUTRELIS C.E., EXADACTYLOS G.E. & KAPENIS A.P., (1990). Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith (éd.), Balkema, Rotterdam, pp. 103-112.

VILLAESCUSA E., (1991). A three dimensional model of rock jointing. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.

ZHANG L. & EINSTEIN H.H., (1998). Estimating the mean trace length of rock discontinuities. Rock Mechanics and Rock Engineering, 31 (4), pp. 217-235.